



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

PEDRO HENRIQUE SOUSA PRADO

**METODOLOGIA HAZOP BASEADA NA TEORIA DE CONJUNTOS
FUZZY: UMA AVALIAÇÃO SEMIQUANTITATIVA DO RISCO
INDUSTRIAL NA INDÚSTRIA DE PROCESSO**

CAMPINAS

2018



PEDRO HENRIQUE SOUSA PRADO

**METODOLOGIA HAZOP BASEADA NA TEORIA DE CONJUNTOS *FUZZY*: UMA
AVALIAÇÃO SEMIQUANTITATIVA DO RISCO INDUSTRIAL NA INDÚSTRIA DE
PROCESSO**

*Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Estadual de Campinas como
parte dos requisitos exigidos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Química.*

Orientador: Prof. Dr. Adilson Pires Afonso.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO PEDRO
HENRIQUE SOUSA PRADO E ORIENTADO PELO PROF.
DR. ADILSON PIRES AFONSO

CAMPINAS

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P882m Prado, Pedro Henrique Sousa, 1988-
Metodologia HAZOP baseada na teoria de conjuntos fuzzy : uma avaliação semiquantitativa do risco industrial na indústria de processo / Pedro Henrique Sousa Prado. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Adilson Pires Afonso.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Avaliação de riscos. 2. Lógica fuzzy. I. Afonso, Adilson Pires, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: HAZOP methodology based on fuzzy setting theory : a semi-qualitative evaluation of industrial risk in the process industry

Palavras-chave em inglês:

Risk assessment

Fuzzy logic

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora:

Adilson Pires Afonso [Orientador]

Cesar Ferreira do Nascimento

Antonio Carlos Luz Lisboa

Data de defesa: 18-09-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação de Mestrado defendida por Pedro Henrique Sousa Prado e aprovada em 18 de setembro de 2018 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Adilson Pires Afonso – Orientador
FEQ/UNICAMP

Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisbôa
FEQ/UNICAMP

Dr. Cesar Ferreira do Nascimento
SAFETYTIME CONSULTORIA LTDA

A ATA da Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

“For a long time, people were saying that most accidents were due to human error and this is true in a sense but it’s not very helpful. It’s a bit like saying that falls are due to gravity”.

Dr. Trevor Kletz

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, João Prado e Silvana, e aos meus queridos irmãos, Felipe e Julia, que apesar da distância sempre me incentivaram em todos os meus desafios e sempre fizeram de tudo para que eu pudesse realizar meus sonhos.

A Fernanda Borges, minha companheira e amiga, que sempre me incentivou e apoiou em todos momentos deste trabalho. Sem dúvidas essa também é uma conquista sua.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adilson Pires Afonso, pelos ensinamentos, dedicação na orientação deste trabalho e amizade.

Aos membros da banca Dr. Cesar Ferreira do Nascimento e Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisbôa e aos demais professores, em especial Prof. Dr. Leonardo Vasconcelos Fregolente, e funcionários da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

Aos amigos de Campinas e Divinópolis-MG, em especial Flavio Benevides, Mathilde Champeau e Kaciane Andreola pela inspiração e conselhos.

À PETRONEW engenharia, em especial ao Alexandre Macedo, Elmer Dennis Fabio Sorg, Marcelo Mathias e Paulo Ribeiro.

Aos amigos da PETROBRAS/REPLAN que de alguma forma me ajudaram durante os dois anos de mestrado, em especial aos membros da equipe de engenharia: Cassius Duarte, Célio Rosa, Luiz Garcia.

Por fim, a todos profissionais que trabalham com segurança de processos no Brasil, que não poupam esforços para salvar vidas e evitar acidentes em nossas instalações industriais.

RESUMO

Nas indústrias de processo, indústrias que agregam valor aos materiais por meio de processos de separação, conformação ou reações químicas, o termo segurança é sempre discutido com grande rigor, uma vez que a história nos mostra inúmeros acidentes ocorridos no passado e que o descuido com a segurança pode causar grandes impactos financeiros e a saúde das pessoas. Por isso, as técnicas de análise e avaliação dos riscos e perigos desempenham um papel importante, sendo largamente utilizadas no meio industrial. A metodologia de Estudo de Perigos e Operabilidade, ou HAZOP, se destaca como a técnica de identificação e análise de risco mais utilizada na indústria, apresentando bons resultados em inúmeras aplicações. Entretanto, por se tratar de uma técnica puramente qualitativa, que utiliza conceitos subjetivos, verbais e linguísticos, o HAZOP pode apresentar incertezas e imprecisões em seus resultados. Ainda, pontua-se que tais incertezas tendem a aumentar a medida em que a inexperiência do grupo que aplica esta metodologia é acentuada. Paralelamente, a teoria dos conjuntos *Fuzzy* vem apresentando ótimos resultados em aplicações de engenharia em que se deseja modelar e manipular matematicamente conceitos linguísticos que podem ser genéricos e imprecisos. Diferentemente da lógica convencional (booleana), em que um objeto pertence ou não a um conjunto, a lógica *Fuzzy* utiliza funções matemáticas para explicitar a pertinência em um determinado conjunto, que pode variar entre 0 (não pertence) e 1 (pertence totalmente). Isto faz com que expressões verbais como “frequente”, “remoto” e “raro” sejam facilmente modeladas nesta lógica através de curvas de pertinência. Diante disso, neste trabalho aplicou-se a teoria dos conjuntos *Fuzzy* no processo de avaliação de risco do HAZOP. As categorias qualitativas de frequência, severidade e risco foram transformadas em conjuntos *Fuzzy* e, por meio dos processos de Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação, foi possível calcular o risco de forma matemática. O HAZOP elaborado com a teoria *Fuzzy* é mais sofisticado pois, através dos conjuntos *Fuzzy*, é possível incorporar dados quantitativos de frequência de ocorrência no cálculo do risco. Um estudo de caso de avaliação de risco foi proposto e a metodologia desenvolvida neste trabalho aplicada. Quando comparado aos resultados obtidos na metodologia HAZOP convencional, a nova ferramenta apresenta valores de risco com menor magnitude, uma vez que os dados quantitativos puderam reduzir as incertezas presentes na estimativa qualitativa do risco industrial.

Palavras-Chave: lógica *fuzzy*; avaliação de risco; HAZOP.

ABSTRACT

In process industries, the term safety is always discussed with great rigor, since our history shows us numerous accidents that have occurred in the past and that carelessness with safety can cause major financial and human health impacts. Therefore, risk analysis and risk assessment techniques play an important role and are widely used in the industrial environment. The Hazard and Operability Study methodology, or HAZOP, stands out as the technique of identification and analysis of risk most used in the industry, presenting good results in numerous applications. However, because it is a purely qualitative technique that uses subjective, verbal and linguistic concepts, HAZOP can present uncertainties and inaccuracies in its results. Also, it is pointed out that such uncertainties tend to increase as the inexperience of the group applying this methodology is accentuated. At the same time, Fuzzy sets theory has presented great results in engineering applications in which it is desired to model and manipulate mathematically linguistic concepts that may be generic and imprecise. Unlike the traditional Boolean logic, in which an object belongs or not to a set, Fuzzy logic uses mathematical functions to make explicit the pertinence in a given set, which can vary between 0 (does not belong) and 1 (totally belongs). This makes verbal expressions such as "frequent", "remote" and "rare" easily shaped in this logic by membership functions. Therefore, in this work, the Fuzzy set theory was applied in the risk assessment process of HAZOP. The qualitative categories of frequency, severity, and risk were transformed into Fuzzy sets and, through the Fuzzification, Inference and Defuzzification processes, it was possible to calculate the risk in a mathematical way. Hazop elaborated with the Fuzzy theory is more sophisticated because, through the Fuzzy sets, it is possible to incorporate quantitative data of frequency of occurrence in the calculation of the risk. A risk assessment case study was proposed and the methodology developed in this work was applied. When compared to the results obtained in the conventional Hazop methodology, the new approach presents values of risk with smaller magnitude, since the quantitative data could reduce the uncertainties present in the qualitative estimation of industrial risk.

Key-words: fuzzy logic; risk assessment, HAZOP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Gerenciamento de risco e suas etapas.....	24
Figura 2.2: Ilustração do conceito ALARP.....	26
Figura 2.3: Camadas de proteção conforme CCPS.....	28
Figura 2.4: Visão geral da Análise Preliminar de Riscos (APR).	32
Figura 2.5: Visão geral da Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA).	33
Figura 2.6: Visão geral da Análise de Árvore de Falhas (FTA).	35
Figura 2.7: Conceito do cenário de um acidente.....	37
Figura 2.8: Conceito da árvore de eventos.....	37
Figura 2.9: Visão geral das etapas do estudo do HAZOP.....	45
Figura 2.10: Exemplo de planilha HAZOP.....	46
Figura 2.11: Diferença entre conjuntos convencionais e conjuntos <i>Fuzzy</i>	48
Figura 2.12: Núcleo, Fronteira e suporte das funções <i>Fuzzy</i>	49
Figura 2.13: Os operadores lógicos aplicados na lógica clássica e na lógica <i>Fuzzy</i>	50
Figura 2.14: Diagrama esquemático do sistema de inferência <i>Fuzzy</i>	51
Figura 2.15: Visão geral do processo de inferência em sistemas nebulosos.....	52
Figura 2.16: Visão geral do processo de inferência em sistemas nebulosos.....	53
Figura 2.17: O uso do operador nebuloso OR.....	54
Figura 2.18: Aplicação do operador de implicação <i>min</i>	55
Figura 2.19: Aplicação do método de agregação <i>max</i>	56
Figura 2.20: O processo de defuzzificação.	57
Figura 3.1: Intervalos dos conjuntos convencionais de frequência.....	64
Figura 3.2: Intervalos dos conjuntos convencionais de severidade.	64
Figura 3.3: Intervalos dos conjuntos convencionais de Risco.	65
Figura 3.4: Núcleo, Fronteira e suporte das funções <i>Fuzzy</i>	67
Figura 3.5: Gráfico da categoria de frequência provável convencional.....	70

Figura 3.6: Função de pertinência da categoria de frequência provável <i>Fuzzy</i>	71
Figura 3.7: Funções de pertinência <i>Fuzzy</i> da entrada frequência.....	73
Figura 3.8: Funções de pertinência <i>Fuzzy</i> da entrada severidade.	73
Figura 3.9: Funções de pertinência <i>Fuzzy</i> da saída risco industrial.	74
Figura 3.10: Divisão de áreas para cálculo do centroide.....	76
Figura 3.11: Cálculo do Risco- <i>Fuzzy</i>	76
Figura 3.12: Planilha convencional de HAZOP.....	77
Figura 3.13: Código-Fonte de criação das funções de frequência.	78
Figura 3.14: Código-Fonte de cálculo do grau de pertinência da entrada.....	79
Figura 3.15: Código-Fonte do cálculo da saída das regras <i>Fuzzy</i>	80
Figura 3.16: Código-Fonte do cálculo das funções das categorias de risco.....	80
Figura 3.17: Código-Fonte do cálculo das áreas e centro das áreas.....	81
Figura 3.18: Matriz de Risco- <i>Fuzzy</i>	81
Figura 3.19: Matriz de Risco- <i>Fuzzy</i> em vista superfície.....	82
Figura 3.20: Planilha de HAZOP- <i>Fuzzy</i>	82
Figura 3.21: Fluxograma de engenharia.....	84
Figura 3.22: Simbologia e legenda do fluxograma de engenharia.....	84
Figura 3.23: Primeiro Nó de estudo.	86
Figura 3.24: Segundo nó de estudo.	86
Figura 3.25: Análise de Árvore de Evento para falha da válvula de controle FCV-10-01.	91
Figura 3.26: Análise de Árvore de Evento para falha do operador.....	91
Figura 4.1: Distribuição dos níveis de risco por nó de estudo (a) Nó 1 e (b) Nó 2.....	93
Figura 4.2: Distribuição dos níveis de risco no Nó 1 por variável.....	94
Figura 4.3: Distribuição dos níveis de risco do Nó 1 em cada variável (a) Pressão, (b) Vazão e (c) Temperatura.....	94
Figura 4.4: Distribuição dos níveis de risco no Nó 2 por variável.....	95

Figura 4.5: Distribuição dos níveis de risco do Nó 1 em cada variável (a) Pressão, (b) Nível, (c) Vazão e (d) Temperatura.....	95
Figura 4.6: Distribuição dos níveis de Risco- <i>Fuzzy</i> por nó de estudo (a) Nó 1 e (b) Nó 2.....	96
Figura 4.7: Distribuição dos níveis de Risco- <i>Fuzzy</i> do Nó 1 em cada variável (a) Pressão, (b) Vazão e (c) Temperatura.	97
Figura 4.8: Distribuição dos níveis de Risco- <i>Fuzzy</i> do Nó 2 em cada variável (a) Pressão, (b) Nível, (c) Vazão e (d) Temperatura.	98
Figura 4.9: Superfície do risco (a) convencional e (b) <i>Fuzzy</i>	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Limites da região ALARP utilizados no Reino Unido.....	27
Tabela 2.2: Comparativo entre técnicas qualitativas e quantitativas.	30
Tabela 2.3: Parâmetro, palavra-Guia e desvios para HAZOP de Processos Contínuos.....	40
Tabela 2.4: Categorias de frequência.	42
Tabela 2.5: Categorias de Severidade.	42
Tabela 2.6: Matriz de risco.....	43
Tabela 2.7: Categorias de Risco.....	43
Tabela 3.1: Critérios de risco de referência.....	62
Tabela 3.2: Categorias de Frequência.	62
Tabela 3.3: Categorias de Severidade	62
Tabela 3.4: Categorias de Risco.....	63
Tabela 3.5: Matriz de risco convencional	63
Tabela 3.6: Transformação dos conjuntos de Frequência para <i>Fuzzy</i>	72
Tabela 3.7: Transformação dos conjuntos de Severidade para <i>Fuzzy</i>	72
Tabela 3.8: Transformação dos conjuntos de Risco para <i>Fuzzy</i>	72
Tabela 3.9: Funções de pertinência <i>Fuzzy</i> em base logarítmica.	73
Tabela 3.10: Regras <i>Fuzzy</i> utilizadas para cálculo do Risco.....	75
Tabela 3.11: Exemplos de desvios identificados.	87
Tabela 3.12: Calculo de risco convencional.....	89
Tabela 3.13: Valores típicos de causas iniciadoras.	90
Tabela 3.14: Exemplos de desvios identificados.	90
Tabela 3.15: Regras <i>Fuzzy</i> utilizadas para cálculo do Risco.....	92
Tabela 4.1: Comparação da média e do desvio padrão no HAZOP convencional.	96
Tabela 4.2: Comparação da média e do desvio padrão no HAZOP- <i>Fuzzy</i>	97
Tabela 4.3: Riscos calculados no Hazop Convencional e HAZOP- <i>Fuzzy</i>	99
Tabela 4.4: Comparação da média e do desvio padrão entre HAZOP convencional e <i>Fuzzy</i> . 99	

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Universo de discurso	[-]
$\mu_A(x)$	Grau de pertinência do elemento x com o conceito expresso em A	[-]
A	Conjunto <i>Fuzzy</i> de entrada primário	[-]
B	Conjunto <i>Fuzzy</i> de saída	[-]
C	Conjunto <i>Fuzzy</i> de entrada secundário	[-]
E (AND)	Operador matemático booleano E	[-]
OU (OR)	Operador matemático booleano OU	[-]
Q	Intervalo <i>Fuzzy</i>	[-]
$E(Q)$	Valor médio esperado de um número <i>Fuzzy</i> Q	[-]
P	Função de probabilidade	[-]
$E(P)$	Valor esperado de uma distribuição P	[-]
$F(x)$	Função de distribuição de probabilidade	[-]
$E_*(Q)$	Valor médio esperado inferior	[-]
$E^*(Q)$	Valor médio esperado inferior	[-]
$F^*(u)$	Função superior de distribuição de P	[-]
$F_*(u)$	Função superior de distribuição de P	[-]
x	Valor da variável de entrada da função de pertinência	[-]
q_-	Valor inferior do núcleo da função de pertinência	[-]
q_+	Valor superior do núcleo da função de pertinência	[-]
s_-	Valor inicial do intervalo de fronteira inferior da função de pertinência	[-]

s_+	Valor final do intervalo de fronteira superior da função de pertinência	[-]
α	Tamanho da fronteira inferior da função de pertinência	[-]
β	Tamanho da fronteira superior da função de pertinência	[-]
m_{ari}	Média aritmética entre o valor esperado superior $E^*(Q)$ e inferior $E_*(Q)$	[-]
m_{geo}	Média geométrica entre o valor esperado superior $E^*(Q)$ e inferior $E_*(Q)$	[-]
X^*	Centro das áreas (centroide)	[-]
A_i	Área da subárea i^{th}	[-]
X_i	Centro da subárea i^{th}	[-]

ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGR	Análise Grosseira de Risco
AIChE	<i>American Institute of Chemical Engineers</i>
ALARP	<i>As Low As Reasonably Practicable</i>
APR	Análise Preliminar de Risco
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIA	<i>Chemical Industries Association</i>
ETA	<i>Event Tree Analysis</i>
FHERAM	<i>Fuzzy Human Error Risk Assessment</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FMEDA	<i>Effects, and Diagnostic Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i>
HSC	<i>Health and Safety Commission</i>
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
ICI	<i>Imperial Chemical Industries</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

MTb	Ministério do Trabalho Brasileiro
NBR	Norma Brasileira
NR	Normas Regulamentadoras
SIS	Sistemas Instrumentados de Segurança
OREDA	<i>The Offshore and Onshore Reliability Data</i>
VBA	<i>Visual Basic Application</i>

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
ABREVIATURAS	15
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.1 Objetivos.....	22
1.1.1 Objetivo geral	22
1.1.2 Objetivos específicos	22
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1 Risco industrial na indústria de processo	23
2.2 Técnicas de análise de risco.....	28
2.2.1 Análise preliminar de riscos	31
2.2.2 Análises de modos de falhas e efeitos	32
2.2.3 Análise de árvore de falhas	34
2.2.4 Análise de árvore de eventos	36
2.2.5 Estudo de perigos e operabilidade - <i>HAZOP</i>	38
2.3 Lógica <i>Fuzzy</i>	47
2.3.1 Fuzzificação das entradas	52
2.3.2 Aplicação dos operadores <i>Fuzzy</i>	53
2.3.3 Implicação das regras <i>Fuzzy</i>	54
2.3.4 Agregação das saídas	55
2.3.5 Defuzzificação	56
2.3.6 Conjuntos <i>Fuzzy</i> aplicados na avaliação de segurança.....	57
3 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO	60
3.1 Definição de critérios e parâmetros de risco industrial	60
3.2 Transformação para conjuntos <i>Fuzzy</i>	65
3.3 Elaboração de regras <i>Fuzzy</i> e modelo de inferência.....	74
3.4 Desenvolvimento e validação do programa em VBA	77
3.5 Elaboração da planilha HAZOP- <i>Fuzzy</i>	82

3.6	Estudo de caso	83
3.6.1	Sistema proposto: Transferência de produto em um sistema de separação	83
3.6.2	Realização da Sessões HAZOP	86
3.6.2.1	Processo de avaliação de risco-convencional	88
3.6.2.2	Processo de avaliação de risco- <i>Fuzzy</i>	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.1	Resultados da avaliação de risco convencional	93
4.2	Resultados da avaliação de risco <i>Fuzzy</i>	96
4.3	Comparativo entre a avaliação de risco convencional e <i>Fuzzy</i>	98
5	CONCLUSÕES	102
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
	APÊNDICE A - ATA DE REUNIÃO HAZOP-FUZZY	107
	APÊNDICE B – PLANILHA HAZOP FUZZY	108

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A avaliação de riscos nas indústrias de processo¹ tem um papel fundamental no projeto, na construção e operação das plantas industriais. O uso das técnicas de avaliação de risco permite a identificação e redução dos eventos perigosos presentes nas unidades de processo, ou seja, situações com o potencial de causar danos a vida humana, ao meio ambiente e ao patrimônio das empresas (MANNAN, 2013).

Comumente, as metodologias aplicadas na indústria expressam o risco como uma combinação da frequência de ocorrência de um acidente e da severidade de sua consequência. A frequência de ocorrência de um evento, seja ele perigoso ou não, é determinada pela chance ou probabilidade de ocorrência deste evento em um dado período de tempo, que pode ser anos, meses ou tempo operacional acumulado da planta industrial. Já a severidade é a medida, quantitativa ou qualitativa, de como o cenário incidental impacta recursos humanos, materiais e/ou ambientais, expressada sob a forma de danos à saúde, impactos ao meio ambiente e perdas econômicas (RAUSAND, 2011).

Os grandes acidentes industriais ocorridos, tais como Flixborough (1974)², Three Mile Island (1979)³, Bhopal (1984)⁴, Chernobyl (1986)⁵ e Golfo do México (2010)⁶ chamaram a atenção para as empresas e para o poder público sobre às questões envolvidas com os riscos industriais e seus limites de tolerabilidade. Pode-se dizer ainda que os grandes acidentes foram os principais responsáveis por impulsionar a criação de metodologias de análise e avaliação dos riscos na indústria de processo (LLORY, 1999).

Além disso, diversos pesquisadores sugerem que a exposição ao risco em nossa sociedade tem crescido consideravelmente nos últimos anos. Dentre as principais razões para este aumento, pode-se citar: as relações complexas entre humanos e automação dos processos

1 Indústrias que, segundo King (1990), agregam valor aos materiais por meio de processos de separação, conformação ou reações químicas.

2 Explosão originada por vazamento de ciclohexano ocorrido em 1974, em uma planta localizada na cidade de Flixborough, Reino Unido, que causou a morte de 28 pessoas, lesões graves de 36 funcionários da empresa e de 53 pessoas do público nos arredores da planta (LLORY, 1999).

3 Acidente nuclear na usina nuclear de Three Mile Island, Estados Unidos da América, ocorrido em 1979, que causou o derretimento nuclear parcial de um reator nuclear liberando gases radioativos que contaminou uma área de até 16 quilômetros em volta da usina nuclear (LLORY, 1999).

4 Considerado o maior desastre da indústria química da história, este acidente, ocorrido em 1984 na cidade de Bhopal, Índia, foi causado pelo vazamento do gás tóxico Isocianato de Metila. Estima-se que cerca de 3 mil pessoas morreram no dia do acidente, somado a quase 200 mil vítimas com ferimentos e sequelas permanentes, sendo que várias delas morreram nos dias posteriores ao acidente (LLORY, 1999).

5 Explosão e incêndio ocorrido em 1986 na usina nuclear de Chernobyl, localizada na Ucrânia, então localizada na União Soviética, causou o lançamento de grandes quantidades de partículas radioativas na atmosfera. Considerado o pior acidente nuclear da história, matou 31 pessoas no acidente e, devido a exposição à radiação, ocasionou a morte de milhares de pessoas nos dias posteriores. Ainda, estima-se que diversas pessoas sofrem os efeitos a longo prazo da radiação, como câncer e deformidades (LLORY, 1999).

6 Vazamento de petróleo cru causado pela explosão da plataforma Deepwater Horizon, ocorreu em 2010 no Golfo do México a aproximadamente 80 quilômetros da costa da Louisiana, Estados Unidos da América. É considerado o pior acidente ambiental da história, com a contaminação do mar e praias por cerca de 3 milhões de barris de petróleo cru. Ainda, contabiliza-se 11 fatalidades que ocorreram na explosão da plataforma Deepwater Horizon (NUNES et al., 2015).

de produção; o aumento da capacidade das instalações industriais que geram um potencial de acidentes em larga escala; a busca constante pelo aumento de produção de plantas industriais; e a redução de custos de manutenção de equipamentos, que é um reflexo da competitividade agressiva de mercado (LEVESON, 2004).

Uma das técnicas de avaliação de perigos da indústria de processo mais utilizadas por empresas é o estudo HAZOP (“*Hazard and Operability Study*”). Proposta pela Imperial Chemical Industries (ICI) nos anos 1960 (KLETZ, 1999), a metodologia HAZOP tem sua origem em técnicas de identificação de perigos desenvolvidas para a indústria química e se caracteriza como um estudo sistemático realizado por um grupo multidisciplinar que examina os possíveis desvios que podem causar perigos e problemas operacionais nas unidades de processo.

Apesar de amplamente utilizado nas indústrias, o HAZOP pode apresentar um alto grau de incerteza em seus resultados, uma vez que a qualidade desta técnica depende da participação de especialistas experientes munidos de informações detalhadas a respeito do sistema analisado. Rausand (2011) apresenta a incerteza nas técnicas de avaliação de risco como a medida do grau de confiança que se tem nos resultados. O autor ainda ressalta que existe uma busca continua para a diminuição das incertezas nas técnicas de avaliação de risco, de modo a se ter maior eficácia no processo de gestão dos riscos industriais.

O estudo HAZOP utiliza variáveis linguísticas baseadas na experiência humana dos participantes. Na metodologia, a categorização do risco é dada por expressões verbais do grau de severidade e frequência do evento perigoso. Expressões como “muito raro”, “frequente”, “provável”, “crítico” e “catastrófico” são utilizadas no estudo e, se não vinculadas a critérios objetivos, podem ser inerentes fontes de incertezas, uma vez que tais expressões são vagas e subjetivas.

Paralelamente, nas últimas décadas evidenciou-se um grande crescimento da utilização de técnicas de Inteligência Artificial em problemas de engenharia que possuem alto grau de incertezas e subjetividade. A lógica *Fuzzy* ou lógica Nebulosa, uma das áreas da inteligência artificial proposta por Zadeh (1965), nos fornece um método em que é possível traduzir expressões verbais qualitativas, genéricas e imprecisas em valores numéricos e, portanto, permite a modelagem do raciocínio humano de forma estruturada e de fácil manipulação (SHAW & SIMÕES, 2007).

Diferentemente da lógica clássica, que é bivalente e atribui apenas os valores de verdadeiro e falso, a lógica Nebulosa é multivalente e capaz de reconhecer uma multitude de valores, criando um grau de certeza no intervalo de $[0,1]$. A multivaloração criada pelos conjuntos *Fuzzy* permite o manuseio de expressões verbais, qualitativas e inerentes a comunicação humana, traduzidas em expressões de termos com vários graus de incertezas, em que a certeza absoluta é representada pelo valor 1 (SHAW & SIMÕES, 2007).

Diante disso, consegue-se identificar uma grande sinergia entre a teoria dos conjuntos *Fuzzy* e a técnica HAZOP, uma vez que o uso da lógica Nebulosa permite a manipulação numérica das categorias qualitativas de frequência e severidade presentes no estudo de risco. Pontua-se ainda que esta manipulação numérica permite que se assumam graus de certeza para cada categoria de severidade e frequência e que, posteriormente, o cálculo do risco industrial presente em um determinado cenário possa ser realizado.

Ressalta-se ainda que resultados equivocados na avaliação do risco na indústria de processo podem trazer diversas consequências negativas ao projeto e à operação de uma planta. A superestimação do risco faz com que medidas para prevenção e/ou mitigação sejam implementadas, o que aumenta os custos na construção e operação das plantas industriais. Por outro lado, caso seja subestimado, pode colocar a vida de pessoas e equipamentos a um risco intolerável, que será mascarado pelos resultados incorretos das técnicas de avaliação de risco. Sendo assim, de maneira geral, o setor industrial tem apresentado um esforço contínuo no desenvolvimento de novas metodologias e procedimentos que possam reduzir as incertezas e melhorar os resultados dos processos de avaliação de risco.

Dentro deste contexto, a ideia central desta dissertação é desenvolver uma nova metodologia HAZOP de avaliação de risco industrial que, baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy*, tem um potencial de minimizar as incertezas e erros presentes na técnica HAZOP convencional. Ainda, tem-se que o desenvolvimento de novas técnicas de avaliação e análise de risco, seja de forma qualitativa ou quantitativa, vai ao encontro das tendências mundiais da área de segurança industrial, que concentra esforços contínuos no sentido de aperfeiçoar os métodos de estimação e caracterização dos níveis de risco nas indústrias de processo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal da presente pesquisa é utilizar a teoria dos conjuntos *Fuzzy* na metodologia HAZOP (“Hazard and Operability Study”) com o intuito de desenvolver uma nova metodologia semiquantitativa de avaliação de riscos industriais na tentativa de diminuir as incertezas e imprecisões das avaliações qualitativas convencionais utilizadas na indústria.

1.1.2 Objetivos específicos

Para elaboração da nova metodologia de avaliação de riscos, se faz necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar como são realizadas as técnicas convencionais de avaliação de riscos e como as incertezas estão presentes nestas avaliações.
- Definir para o presente estudo os valores e aspectos dos níveis de risco tolerável e aceitável na indústria de processo.
- Elaborar as funções de pertinência e regras *Fuzzy* para frequência, severidade e risco industrial.
- Desenvolver um programa para o ambiente Microsoft Excel®, desenvolvido na linguagem de programação *Visual Basic Application (VBA)*, que seja capaz de calcular o risco industrial por meio da teoria de conjunto *Fuzzy* a partir de dados de frequência e severidade.
- Realizar um comparativo entre a metodologia proposta na presente investigação e o método HAZOP convencional na análise e avaliação do risco industrial. Pretende-se realizar uma aplicação prática, por meio de um estudo de caso, de ambas metodologias de avaliação de riscos em uma determinada planta de processo químico.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre risco industrial na indústria de processo, bem como as técnicas usualmente utilizadas para se estimar o risco presente nas plantas industriais. Também serão expostos aspectos conceituais sobre a teoria dos conjuntos *Fuzzy* e de aplicações de técnicas de inteligência artificial aplicadas nas avaliações de segurança de processo.

2.1 Risco na indústria de processo

A palavra risco é usualmente utilizada em diversas situações e com significâncias distintas, sendo comum encontrá-la em livros, artigos e jornais como sinônimo de chance, probabilidade ou possibilidade. Por outro lado, a palavra risco também é comumente associada a perigo, ameaça ou prejuízo.

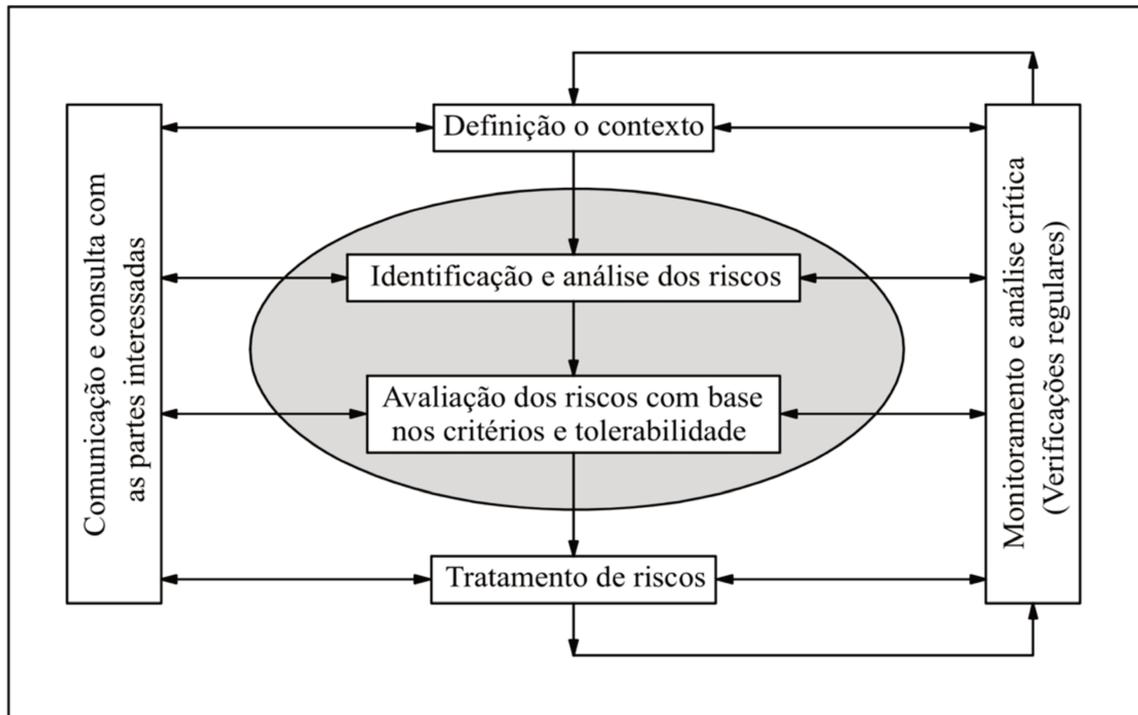
A ABNT NBR ISO 31000 (2009) apresenta o conceito de risco como o efeito da incerteza, causada por influência de fatores internos e externos, nos objetivos da organização, ou seja, é o desvio em relação ao esperado. A norma indica que os objetivos da organização podem ter diferentes aspectos, sendo estes as metas financeiras, de saúde, de segurança e relacionadas ao meio ambiente. Neste contexto, o risco é comumente expresso em termos de uma combinação da probabilidade de ocorrência de um evento e as consequências causadas por este evento.

Afim de reduzir os riscos presentes em seus processos, diversas organizações utilizam metodologias e práticas de gerenciamento de risco. O gerenciamento de risco pode ser definido como um processo organizacional contínuo que tem como objetivo identificar, analisar, mensurar e propor medidas de controle de risco para eliminar e/ou reduzir o potencial de dano às pessoas, ao meio ambiente e ao patrimônio das organizações (RAUSAND, 2011). Apresenta-se na Figura 2.1 uma ilustração do processo global de gerenciamento de risco e suas etapas.

Ressalta-se que a aplicação de metodologias de gerenciamento e redução de risco é de extrema importância na indústria de processo, uma vez que neste tipo de indústria existem muitos perigos que se não controlados podem levar à ocorrência de acidentes com severas consequências. A manipulação de substâncias com altas pressões, elevadas temperaturas e que são tóxicas e/ou inflamáveis pode fazer com que o risco de acidentes em uma indústria de

processo seja bastante elevado, em que os principais perigos envolvidos são incêndio, explosões e liberação de produtos químicos (LEES, 2012).

Figura 2.1: Gerenciamento de risco e suas etapas.



Fonte: adaptado de ABNT NBR ISO 31000 (2009).

A análise de riscos é utilizada para apontar as possíveis causas e consequências dos perigos, identificar e priorizar as medidas de proteção existentes e auxiliar no processo de decisão a respeito da tolerabilidade/aceitabilidade do risco encontrado. Ainda, a análise de risco deve prover a resposta de três questões principais, sendo elas: o que pode acontecer de errado? (identificação do evento perigoso); qual a probabilidade/frequência de que ocorra o evento?; caso ocorra, quais são as consequências? (WALL, 2011, KAPLAN & GARRICK, 1981).

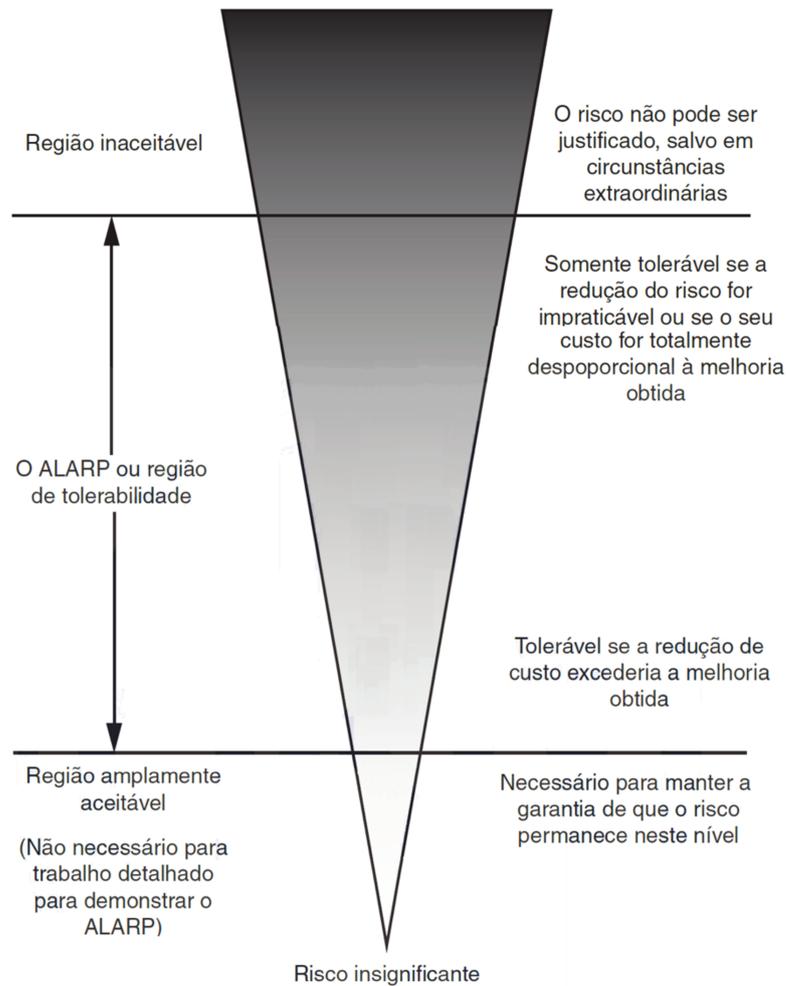
Pode-se dizer que o resultado da análise de riscos é usualmente a base para um processo de tomada de decisões, que está relacionado à alocação dos recursos financeiros para redução de risco, modificação de equipamentos ou implementação de novas medidas de prevenção e/ou mitigação dos perigos existentes. Neste caso, após a obtenção da estimativa do risco existente, seja de forma qualitativa ou quantitativa, deve-se comparar esse resultado com os critérios de nível de risco aceitável, com o objetivo de identificar a redução de risco necessária para o processo avaliado. Neste sentido, a norma brasileira ABNT NBR ISO 31010

(2012) sugere que o critério de risco seja estabelecido antes da condução dos estudos de análise de risco.

Uma abordagem simplificada do critério de risco consiste em categorizar os resultados encontrados em dois grupos, sendo: os riscos que necessitam ser tratados (reduzidos e/ou mitigados) e os riscos que não necessitam (aceitáveis). Esta abordagem binária, no entanto, cria uma fronteira abrupta entre os dois grupos e, por isso, não contempla as incertezas envolvidas na estimativa de riscos, bem como a transição gradual entre diversas magnitudes de risco (ABNT NBR ISO 31010, 2012).

Para reduzir as incertezas na categorização dos riscos, uma abordagem de critério de risco bastante utilizada na indústria, proposta inicialmente pelo Health and Safety Executive (HSE), agência governamental de saúde e segurança do Reino Unido, considera o princípio “Tão Baixo Quanto Razoavelmente Praticável” (ALARP – do Inglês, “As Low As Reasonably Practicable”), que divide o risco em três categorias: inaceitável, amplamente aceitável e intermediário. Os riscos considerados inaceitáveis são aqueles que, independentemente dos benefícios para a atividade, devem ser reduzidos a qualquer custo. As atividades com esse nível de risco não são aceitáveis, exceto em extraordinárias circunstâncias, como, por exemplo, em períodos de guerra. Já os riscos amplamente aceitáveis podem ser considerados como desprezíveis e, normalmente, nenhuma medida para sua redução é necessária. Por fim, os riscos categorizados na região intermediária, também denominada de região tolerável ou região ALARP, são aqueles que sua redução é desejada. Porém, as medidas de redução podem não ser implementadas caso exista uma desproporção “grosseira” entre o custo destas medidas e os ganhos obtidos. As regiões do princípio ALARP são apresentadas na Figura 2.2 (HSE, 2001; RAUSAND, 2011).

Figura 2.2: Ilustração do conceito ALARP.



Fonte: adaptado de Rausand (2011).

Como apresentado, a Figura 2.2 ilustra os dois limites presentes no princípio ALARP: limite superior, entre a região inaceitável e a região ALARP e limite inferior, que separa as regiões ALARP e amplamente aceitável. O princípio ALARP é relevante principalmente para o risco relacionado aos seres humanos. Na prática, o eixo vertical da Figura 4.2 pode, por exemplo, ser uma medida do risco individual. A Tabela 2.1 apresenta, baseada no indicador de risco individual (fatalidade/ano), os valores do limite superior e inferior do princípio ALARP recomendados pelo órgão HSE utilizados no Reino Unido (HSE, 2001; HSE 1992).

Tabela 2.1: Limites da região ALARP utilizados no Reino Unido

Limite	Probabilidade por Ano		Para quem
Superior	1 em 1.000	10^{-3}	Força de trabalho da empresa
	1 em 10.000	10^{-4}	Público (para plantas industriais existentes)
	1 em 100.000	10^{-5}	Público (para novas plantas industriais)
Inferior	1 em 1.000.000	10^{-6}	Geral (Força de Trabalho / Público)

Fonte: Adaptado de HSE (2001).

Segundo Rausand (2011) a essência do princípio ALARP declara que os recursos financeiros devem ser gastos na redução dos riscos até que eles sejam razoavelmente baixos e que, enquanto os riscos não estiverem na região amplamente aceitável, deve-se continuar reduzindo-os até que o gasto financeiro seja “grosseiramente desproporcional” aos benefícios, ou seja, deve-se reduzir os riscos até que seja “razoavelmente praticável”. Ao mesmo tempo, sabe-se que nem todos os riscos podem ser eliminados, uma vez que em alguns casos não é praticável tomar novas medidas para sua redução. Diante disto, com a utilização do princípio ALARP, haverá sempre algum risco residual de acidentes. Ressalta-se que uma das grandes vantagens do princípio ALARP é o favorecimento da implementação de medidas de segurança, uma vez que o termo “razoavelmente praticável” indica que a redução de risco deve ser implementada a menos que se demonstre haver uma desproporção óbvia e grosseira entre o custo e os benefícios gerados pela medida de segurança.

Tendo em vista a definição de risco como uma combinação da probabilidade de ocorrência de um evento e as consequências causadas por este evento, sua redução é baseada na implementação de dois tipos de medidas, sendo elas: preventivas e mitigadoras. As medidas preventivas têm o objetivo de reduzir a frequência/probabilidade do evento perigoso, sendo chamadas também de medidas proativas. Já as medidas mitigadoras têm o propósito de evitar ou reduzir as consequências do evento potencialmente perigoso, sendo denominadas também como medidas reativas (RAUSAND, 2011).

O Centro para a Segurança de Processos Químicos (CCPS – do Inglês, “Center for Chemical Process Safety”), estabelecido em 1985 pelo Instituto Americano de Engenheiros Químicos (AIChE – do Inglês, “American Institute of Chemical Engineers”), introduziu o conceito da implementação de camadas de proteção que possibilitam a redução dos riscos

industriais a níveis aceitáveis ou toleráveis. De maneira geral, quando o perigo não pode ser evitado pelo projeto inerentemente seguro, deve-se utilizar camadas de proteção adicionais com o objetivo de reduzir a frequência do evento perigoso ou realizar a mitigação de sua severidade. Dentre as camadas de proteção utilizadas, podemos citar: utilização do conceito de inerentemente seguro durante o projeto do processo, Sistema de Automação e Controle de Processos, Sistema Instrumentado de Segurança (SIS), dispositivos passivos como diques e barreiras de proteção, dispositivos ativos como válvulas de segurança e a intervenção humana no processo. Apresenta-se na Figura 2.3 uma ilustração dos métodos típicos de redução de risco das plantas de processo apresentados como camadas de proteção (CCPS, 2007; CCPS 2001).

Figura 2.3: Camadas de proteção conforme CCPS.



Fonte: adaptado de CCPS (2001).

2.2 Técnicas de análise de risco

No decorrer da história da indústria, o desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de análise de risco foram sempre impulsionados pela ocorrência de grandes acidentes

de processo, os quais podem envolver substâncias químicas ou radioativas. Diversas leis, normas regulamentadoras e diretrizes técnicas foram criadas por companhias e agências regulatórias em resposta a alguns acidentes em particular, de modo a proporcionar uma redução futura dos riscos em plantas de processos similares. No célebre livro de segurança “*What Went Wrong?*”, Trevor Kletz afirma que as lições aprendidas nos acidentes são importantes para prevenir acidentes no futuro. Ainda, o autor declara que a memória viva dos acidentes e de suas causas são uma informação extremamente valiosa para engenheiros químicos envolvidos com segurança de processos, uma vez que a história demonstra que tais acidentes se repetem após um período de poucos anos (KLETZ, 2009).

De maneira geral, pode-se considerar que as técnicas de análise de risco surgiram da necessidade de segurança em ambientes com altos níveis de risco. A partir dos anos 70, as metodologias e técnicas de avaliação de risco, aplicadas especialmente apenas nas áreas militares e espacial, tornaram-se um item presente em quase todas indústrias de processos químicos e petroquímicos (QUINTELLA, 2011, ALBERTON, 1996).

Para Rausand (2011) os objetivos principais das técnicas de análise de risco são: identificar os perigos e ameaças relacionadas com o objeto de estudo; identificar o potencial dos eventos perigosos que podem ocorrer no objeto de estudo; encontrar as causas de cada evento perigoso; identificar as proteções e salvaguardas que podem prevenir ou reduzir a probabilidade do evento perigoso e/ou suas consequências; identificar os cenários de acidentes relacionados com cada evento perigoso; determinar as consequências e sua frequência; e, por fim, determinar os níveis de risco de cada cenário.

Existem diversas técnicas de análise de risco comumente categorizadas como qualitativas ou quantitativas. No processo de avaliação de risco, um dos principais dilemas da equipe de segurança baseia-se na definição da utilização de uma técnica qualitativa ou uma técnica quantitativa. Ambas abordagens são úteis, porém, cada abordagem apresenta inerentemente vantagens e desvantagens.

As análises qualitativas de risco utilizam palavras e/ou escalas para descrever a frequência do evento perigoso identificado e a severidade das consequências causadas por este evento. Normalmente, essa abordagem usa categorias para separar diferentes parâmetros, com definições qualitativas que estabelecem os intervalos para cada categoria. Neste caso, os

juízos qualitativos são feitos a respeito da possível categoria em que o parâmetro avaliado pode se encaixar. Por exemplo, o parâmetro “frequência de ocorrência” de um evento perigoso pode ser categorizado como: “frequente”, “provável”, “pouco provável”, “remoto” e “extremamente remoto”. Percebe-se que, nesta abordagem, a categorização do parâmetro é subjetiva, permitindo assim uma maior generalização e, portanto, menos restritiva (RAUSAND, 2011; ERICSON, 2015).

Já nas análises quantitativas, utilizam-se valores numéricos para frequência e para severidade das consequências do evento perigoso. Neste caso, o nível de risco também é obtido de maneira quantitativa. Tal abordagem tem a característica de ser mais objetiva e possivelmente mais precisa. Entretanto, deve-se notar que os resultados quantitativos podem ser influenciados pela validade e precisão dos números de entrada. Diante disso, ressalta-se que os resultados quantitativos obtidos neste tipo de análise não devem ser vistos como um número exato, mas como uma estimativa com um intervalo de variabilidade que depende fortemente da qualidade dos dados (RAUSAND, 2011; ERICSON, 2015).

Apresenta-se na Tabela 2.2 um comparativo das principais vantagens e desvantagens dos métodos qualitativos e quantitativos de análise de risco.

Tabela 2.2: Comparativo entre técnicas qualitativas e quantitativas.

Item	Atributo	Qualitativa	Quantitativa
1	Resultados Numéricos	Não	Sim
2	Custo de execução	Baixo	Alto
3	Subjetiva / Objetiva	Subjetiva	Objetiva
4	Dificuldade	Baixa	Alta
5	Complexidade	Baixa	Alta
6	Dados/informação	Menos detalhada	Mais detalhada
7	Tempo requerido	Baixa	Alta
8	Uso de ferramentas computacionais	Raramente	Usualmente
9	Precisão dos resultados	Baixa	Alta

Fonte: Adaptado de Ericson (2015).

Há também a abordagem escolhida para ser utilizada no presente trabalho. Considerando os aspectos qualitativos e quantitativos, tal abordagem, denominada

semiquantitativa, é apresentada por Rausand (2011) como técnica em que se atribuem valores numéricos às escalas qualitativas. Neste caso, os números alocados nas categorias qualitativas de frequência e severidade podem, ou não, sugerir valores realistas de níveis de risco. Usualmente, as técnicas semiquantitativas têm o objetivo principal de produzir uma priorização mais detalhada do risco, definindo assim um ranqueamento dos riscos de acordo com sua intensidade. As técnicas semiquantitativas geralmente apresentam bons resultados, visto que elas unem a simplicidade das técnicas qualitativas e o refinamento numérico das técnicas quantitativas.

Apresenta-se nos itens a seguir as principais técnicas de análise de risco utilizadas na indústria de processo. Entretanto, o presente trabalho centra-se na transformação, através da teoria dos conjuntos *Fuzzy*, da metodologia HAZOP, originalmente qualitativa, em uma metodologia semiquantitativa, em que a frequência é utilizada como uma variável quantitativa e a severidade como um componente qualitativo.

2.2.1 Análise preliminar de riscos

A análise preliminar de risco (APR), também conhecida como análise preliminar de perigo (APP), é uma técnica de análise de segurança qualitativa utilizada para identificar, durante a fase inicial, de concepção ou desenvolvimento de um novo sistema, riscos e potencial de acidentes podendo também ser utilizada durante intervenções ou manobras operacionais. Neste tipo de análise, com informações preliminares e limitadas, realiza-se basicamente a identificação dos perigos, suas causas associadas, efeitos, nível de risco e possíveis medidas para a mitigação do risco. O procedimento é comumente orientado por noções de onde e como a energia ou materiais perigosos podem ser liberados de forma descontrolada (RAUSAND, 2011).

Segundo Ericson (2015), a análise preliminar de risco (APR) foi uma das primeiras técnicas a ser utilizada na disciplina de segurança de processo, sendo desenvolvida pelo Exército dos EUA (MIL-STD-882D). Inicialmente, este tipo de análise foi denominado Análise Grosseira de Risco (AGR), uma vez que tal estudo fornecia um limitado nível de detalhes. Este estudo preliminar é normalmente refinado, em uma fase posterior do projeto, através de estudos adicionais e mais aprofundados.

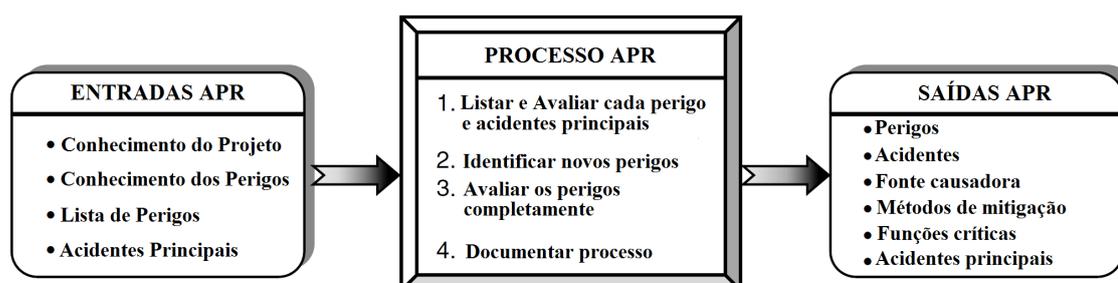
O ponto de partida para a metodologia APR é coletar e identificar os possíveis perigos presentes por meio de uma lista preliminar de perigo. Em seguida, a equipe do APR

avalia todos os perigos identificados e, a fim de identificar riscos previamente não previstos, os compara com problemas conhecidos ou similares. Segundo Quintella (2011) as etapas básicas da APR consistem em

revisão de problemas conhecidos ou similares; verificação de procedimentos de operação; determinação dos riscos principais, identificando os riscos iniciais e contribuintes através da elaboração da Série de Riscos; eliminação ou controle dos riscos, identificação de responsáveis para ações corretivas e preventivas (QUINTELLA, 2011: 55)

Os resultados da APR incluem os riscos identificados e suspeitos, seus fatores de causa e suas consequências e, por fim, possíveis medidas a serem adotadas para redução e/ou mitigação dos acidentes. Tendo em vista que a APR é geralmente iniciada muito cedo na fase de concepção do projeto, os dados disponíveis para a análise podem ser incompletos e informais. Diante disso, o processo de análise deve ser estruturado de modo a permitir uma revisão e atualização contínua conforme as informações iniciais vão sendo modificadas e refinadas durante o desenvolvimento do projeto. Apresenta-se na Figura 2.4 uma visão geral do método APR.

Figura 2.4: Visão geral da Análise Preliminar de Riscos (APR).



Fonte: adaptado de Ericson (2015).

2.2.2 Análises de modos de falhas e efeitos

A Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA – do Inglês, “Failure Mode and Effect Analysis”) é uma técnica que permite avaliar os modos de falhas, ou as maneiras pelas quais um equipamento ou sistema podem falhar, e verificar os efeitos destes modos de falha nos equipamentos, sistemas, componentes ou funções. Tal ferramenta, inicialmente considerada uma técnica de análise qualitativa, é uma das principais ferramentas de confiabilidade para identificar modos de falha que afetariam adversamente a confiabilidade geral do sistema. Tendo

em vista que o FMEA tem a capacidade de incluir taxas de falha para cada modo de falha, a análise pode se tornar quantitativa e probabilística.

Segundo Rausand (2011) a Análise de Modo e Efeitos de Falha é uma das primeiras de um conjunto de técnicas sistemáticas que surgiram para a avaliação da confiabilidade em sistemas e componentes. Desenvolvida no final dos anos 40 pelo setor militar nos EUA, o uso do FMEA foi encorajado na década de 1960 no desenvolvimento de produtos espaciais. Além disso, depois de vários acidentes com a explosão de tanques de gás em um de seus automóveis, a Ford Motor Company introduziu o FMEA no final da década de 1970 no setor automotivo, consolidando esta ferramenta.

O FMEA pode ser usado para identificar riscos de acidentes resultantes de modos de falha potenciais. Neste contexto, o uso da ferramenta permite determinar, a partir da influência das falhas em potencial na confiabilidade do sistema, se são necessárias mudanças no projeto ou na operação para garantir a segurança do sistema. Nesta técnica, os dados de entrada incluem informações detalhadas dos equipamentos, especificações de projeto, esboços, desenhos, esquemas, listas de funções, diagramas de blocos funcionais e/ou diagramas de blocos de confiabilidade. Ainda, usualmente utiliza-se como entrada no estudo os modos de falha conhecidos para componentes e as taxas de falha de cada modo de falha. Já as informações de saída são geralmente a identificação dos modos de falha do sistema em análise, avaliação dos efeitos causados pela falha, identificação de perigos, identificação de itens críticos do sistema e a sugestão de melhorias, objetivando assim a eliminação ou redução dos riscos identificados (RAUSAND, 2011; ERICSON, 2015). Apresenta-se na Figura 2.5 uma visão geral do método FMEA.

Figura 2.5: Visão geral da Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA).



Fonte: adaptado de Ericson (2015).

Quintella (2011, apud DE CICCIO e FANTAZZINI, 1985) afirma que o FMEA é uma técnica muito eficiente quando utilizada em sistemas simples e/ou com falhas de baixa complexidade. Entretanto, sua incerteza em sistemas complexos levou ao surgimento de técnicas mais elaboradas. A Análise de Árvore de Falhas (FTA), por exemplo, é uma técnica que apresenta melhor precisão quando aplicada em sistemas com falhas de alta complexidade.

2.2.3 Análise de árvore de falhas

A Análise de Árvore de Falhas (FTA – do Inglês, “Fault Tree Analysis”) é uma técnica utilizada para identificar as causas raízes e a probabilidade de ocorrência de um evento indesejado. Sendo largamente aplicada em sistemas de grande complexidade, este método, por meio de uma metodologia rigorosa e estruturada, permite compreender e prevenir potenciais acidentes a partir da modelagem das combinações de falhas que podem causar o evento indesejado (ERICSON, 2015).

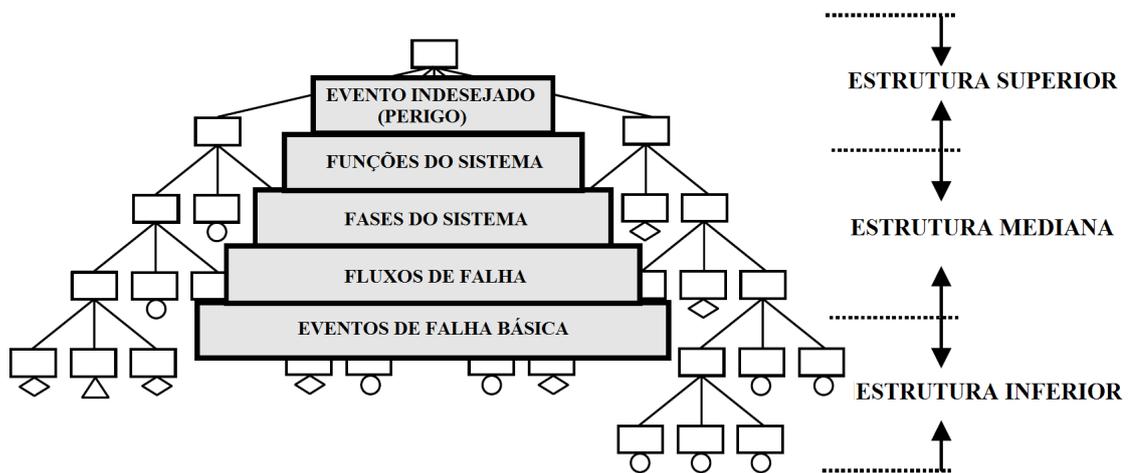
Conforme apresentado por Rausand (2011), a Análise de Árvore de Falhas se mostrou bastante eficaz em aplicações do setor nuclear, químico e na indústria aeroespacial. A técnica FTA foi criada em 1962, por H. Watson e Allison B. Mearns, na *Bell Telephone Laboratories*, para utilização na avaliação de segurança do projeto militar Norte-Americano (EUA) envolvendo o míssil bélico intercontinental Minuteman I. O reconhecimento do sucesso desta técnica ao longo dos anos fez com que muitas pessoas contribuíssem com o seu aperfeiçoamento, aprimorando seus conceitos matemáticos, gráficos e algoritmos computacionais.

O uso da metodologia FTA na análise de segurança consiste em representar de maneira gráfica e lógica as várias combinações de um possível evento, podendo ser normal ou defeituoso, que leva o sistema para um evento indesejável. Neste caso, os eventos indesejados são representados por potenciais acidentes, condições perigosas e falhas indesejadas no processo e em equipamentos. A representação gráfica ilustra as relações dos eventos que causam os eventos indesejados. O caminho de investigação deste método parte de um único evento indesejado, localizado na parte superior da representação gráfica, para todas as possíveis causas raiz, localizadas na parte inferior da árvore de falhas. A análise é considerada dedutiva, uma vez que se parte de um problema geral para suas causas específicas.

Ericson (2015) indica que a Análise de Árvore de Falhas deve começar com a seleção de um evento indesejado, situado no topo da estrutura gráfica e, posteriormente, faz-se

a análise de todas as falhas que podem contribuir para a ocorrência deste evento de topo. Usando um método de análise repetitivo, a estrutura gráfica do FTA é dividida em camadas, níveis e ramificações. Cada camada representa um aspecto do sistema. Apresenta-se na Figura 2.6 uma demonstração da técnica FTA em que as camadas superiores da estrutura representam as funções do sistema e suas fases, a camada intermediária representa o fluxo de falha dos subsistemas e a camada inferior nos mostra as falhas básicas de componentes que podem desencadear os eventos indesejáveis.

Figura 2.6: Visão geral da Análise de Árvore de Falhas (FTA).



Fonte: adaptado de Ericson (2015).

Neste contexto, a capacidade do FTA em determinar, de maneira gráfica e lógica, o evento de falha, sua probabilidade e sua consequência (evento indesejado), nos fornece informações de maneira simples e clara para a tomada de decisões no processo de redução de risco, que é representado pela elaboração de medidas para reduzir ou mitigar os perigos causados pelo evento indesejado. Ainda, pontua-se que a técnica FTA pode ser utilizada na forma quantitativa ou qualitativa. Entretanto, deve-se ter cuidado na escolha do método, uma vez que apesar de mais complexa, a análise quantitativa pode fornecer resultados com uma melhor precisão, já que tal técnica tem como base os dados de taxa de falha dos componentes do sistema. Por outro lado, em sistemas de baixa criticidade, a análise qualitativa, que tem um custo reduzido em sua execução, pode fornecer aos analistas de segurança informações valiosas a respeito dos riscos e perigos existentes (RAUSAND, 2011).

2.2.4 Análise de árvore de eventos

A Análise de Árvore de Eventos (ETA – do Inglês, “*Event Tree Analysis*”) é um método gráfico e probabilístico para modelar e analisar cenários potenciais de acidentes por meio da sequência de eventos que antecedem a ocorrência. O objetivo principal da ETA é determinar, através de um procedimento indutivo e lógico, se um evento inicial irá se desenvolver em um acidente. Além disso, esta técnica permite avaliar se as camadas de proteção existentes podem, após a ocorrência do evento inicial, prevenir a ocorrência do acidente (RAUSAND, 2011).

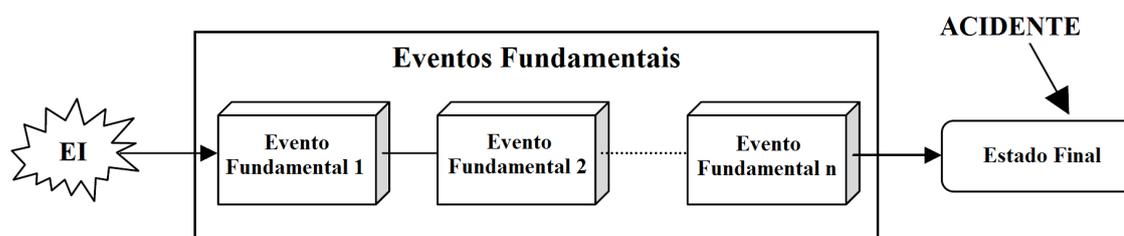
Desenvolvida em 1974 durante a análise de segurança de uma planta nuclear americana, denominada análise WASH-1400, a ETA foi introduzida inicialmente para ser utilizada em complemento à técnica FTA, com o principal objetivo de condensar e simplificar a análise de risco, uma vez que a utilização apenas da técnica FTA se mostrou bastante complexa e extensa. Em aplicações no meio industrial, a árvore de eventos pode ser aplicada independentemente ou em conjunto com a técnica FTA e, dependendo do objetivo da análise e da disponibilidade dos dados, pode ser aplicada de forma qualitativa ou quantitativa (RASMUSSEN, 1975).

Segundo Rausand (2011) a Análise de Árvore de Eventos é a técnica preferida pela indústria para avaliação do desenvolvimento de um acidente em potencial, que é um dos elementos essenciais na análise de risco. O processo de avaliação da ETA começa com o evento inicial (EI) e progride através de eventos fundamentais (EF), que são eventos intermediários ocorridos a partir do evento inicial, até que seja atingido um estado final, sendo esse tipicamente um acidente. Nesta técnica, os EF são os eventos de falha/sucesso das camadas de proteção existentes que podem mitigar ou agravar o cenário acidental. A frequência, ou probabilidade, do EF pode ser obtida a partir de um FTA do evento. De maneira geral, pode-se dizer que se um evento fundamental funcionar com sucesso irá impedir que o cenário acidental se desenvolva, ao passo que se falhar, o cenário do acidente pode avançar e se consolidar como um acidente grave. Um acidente contém um evento inicial (EI) e tipicamente um ou mais eventos fundamentais, que conduzem o cenário incidental até um estado final. Apresenta-se na Figura 2.7 uma ilustração do desenvolvimento do cenário incidental.

A representação gráfica da técnica ETA é o diagrama de árvore de eventos, que é geralmente desenhado da esquerda para a direita a partir dos eventos iniciais. Neste diagrama

os eventos fundamentais (EF) são listados acima do diagrama e cada caminho distinto através da árvore é um cenário distinto. Os eventos fundamentais (EF) são usados para especificar o sucesso ou falha no sistema, sendo que uma convenção geralmente utilizada considera o ramo “para baixo” representando a falha do sistema. Diante disso, os eventos com maior severidade irão se concentrar na parte inferior do diagrama. A Figura 2.8 ilustra o conceito do diagrama da técnica de Análise de Árvore de Eventos.

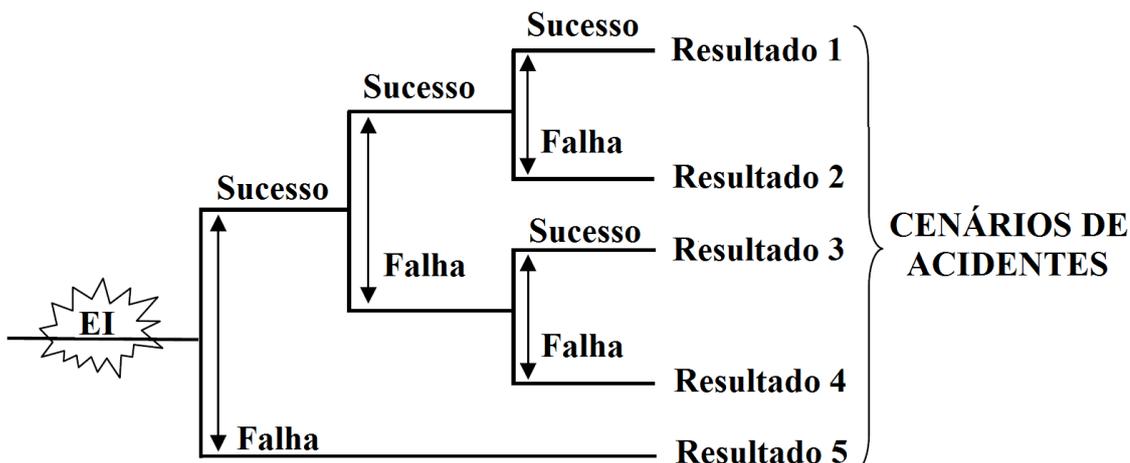
Figura 2.7: Conceito do cenário de um acidente.



Fonte: adaptado de Ericson (2015).

Figura 2.8: Conceito da árvore de eventos.

Evento Inicial	Evento Fundamentais			Resultados
	Evento 1	Evento 2	Evento 3	



Fonte: adaptado de Ericson (2015).

Ericson (2015) aponta inúmeras vantagens para aplicação do método de Análise de Árvore de Eventos. A estrutura rigorosa e metódica contribui para que esta técnica forneça resultados robustos e precisos, sendo aplicada muitas vezes com o auxílio de softwares comerciais especializados. Além disso, a técnica ETA permite que sejam incorporados na

análise de risco diversos eventos baseados em distintas áreas, tais como: hardware, software, meio ambiente e interações humanas.

2.2.5 Estudo de perigos e operabilidade - *HAZOP*

O Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP – do Inglês, “*Hazard and Operability Study*”) é um procedimento sistemático e estruturado, realizado por um grupo multidisciplinar de especialistas que tem como objetivo principal a identificação dos perigos e dos problemas de operabilidade do sistema avaliado. Neste contexto, a metodologia HAZOP proporciona, através do uso de palavras-guia, uma investigação detalhada do processo, identificando, assim, a ocorrência de desvios das condições normais de operação, as causas geradoras destes desvios e suas possíveis consequências. Além disso, um dos produtos da técnica HAZOP pode ser a proposta de medidas para eliminar e/ou reduzir os perigos e problemas operacionais identificados no estudo (RAUSAND, 2011).

A metodologia HAZOP foi inicialmente proposta na Divisão de Produtos Orgânicos Pesados da Imperial Chemical Industries Ltd. (ICI) na década de 1960, sendo consolidada no setor da indústria química de processos apenas após a publicação de um guia da metodologia, no ano de 1977, pela Associação de Indústrias Químicas (CIA – do Inglês, “*Chemical Industries Association*”). Desde seu surgimento, a técnica tem sido largamente utilizada no projeto de novas plantas no setor industrial. Sendo assim, o HAZOP possui, além da capacidade de identificar riscos de segurança, saúde e meio ambiente, uma grande eficácia na identificação de possíveis problemas operacionais que podem ocorrer nas plantas de processo (KLETZ, 1999).

O estudo HAZOP é realizado em uma ou mais reuniões conduzidas na forma de um *Brainstorming* estruturado por palavras-guia, parâmetros de processos e perguntas acerca do sistema avaliado. A planta, ou sistema analisado, é normalmente dividida em Nós de estudo, que são analisados um a um no decorrer do estudo (KLETZ, 1999).

Em sua forma original, a metodologia HAZOP consiste em uma técnica puramente qualitativa de identificação de riscos e problemas operacionais. Entretanto, nos dias atuais, diversas empresas e organizações a adaptaram para que se execute, juntamente com o processo de identificação, a análise e avaliação dos riscos. Tal fato tem contribuído para a consolidação da metodologia no meio industrial, uma vez que a avaliação e categorização dos riscos causados pelos desvios do HAZOP são comumente as bases de um processo de tomada de decisão, que

tem como objetivo a proposta de medidas para a redução e/ou mitigação dos riscos identificados.

Segundo Rausand (2011), o procedimento de um HAZOP típico, atualmente adotado em diversas empresas do segmento de processos químicos e petroquímicos, pode ser realizado em uma sequência de oito passos, sendo eles: Passo 1 - Planejamento e Preparação do Estudo; Passo 2 - Identificação dos Possíveis Desvios; Passo 3 - Determinação das Causas dos Desvios; Passo 4 - Determinação das Consequências do Desvio; Passo 5 - Identificação das Camadas de Proteção ou Salvaguardas; Passo 6 - Avaliação do Risco; Passo 7 - Propostas de Melhorias; e, por fim, Passo 8 - Elaboração do Relatório do Estudo.

Como apresentado acima, o primeiro passo a ser realizado na técnica HAZOP é o **Planejamento e Preparação do Estudo (Passo 1)**. Previamente à aplicação da metodologia, deve-se definir os membros do time do HAZOP, idealmente uma equipe multidisciplinar composta por profissionais de Engenharia Química, Instrumentação/Automação, Mecânica, Segurança e Elétrica, contendo entre 5 a 8 integrantes. Este time, que deve ser formado por especialistas com conhecimentos do projeto, operação e manutenção da planta avaliada, é conduzido nas reuniões de avaliação de risco pelo líder do HAZOP. O líder do time deve estar familiarizado com a técnica HAZOP, garantindo que as tarefas envolvidas nesta metodologia sejam realizadas. Além disso, previamente ao estudo, deve-se recolher informações e documentos do sistema a ser avaliado, tais como: fluxogramas de engenharia, especificação de instrumentos e equipamentos, diagramas e desenhos e códigos e procedimentos operacionais. Por fim, antes do início do HAZOP, deve-se dividir o sistema em nós de estudo, de modo a facilitar a avaliação.

O segundo passo é a **Identificação dos Possíveis Desvios (Passo 2)** que podem ocorrer no sistema avaliado. A equipe do HAZOP inicia o exame de um Nó de estudo pela identificação dos desvios que podem ocorrer neste Nó específico. Em um procedimento estruturado, com o objetivo de definir os desvios presentes, confrontam-se todos os parâmetros presentes no Nó avaliado (vazão, pressão, temperatura, nível.etc) com as palavras-guia existentes. O uso das palavras-guias tem o objetivo de auxiliar o time do HAZOP, por meio de pesquisa criativa e minuciosa, na obtenção dos desvios significativos. Apresenta-se na Tabela 2.3 os parâmetros, as palavras-guia e os desvios gerados pela junção dos parâmetros de processo e das palavras-guia.

Realizada a identificação de todos os desvios presentes no nó de estudo, a próxima etapa a ser executada pelo time do HAZOP consiste na **Determinação das Causas dos Desvios (Passo 3)**. A equipe deve avaliar as causas de todos desvios identificados. O processo de identificação das causas deve ser realizado por todos os membros do time do HAZOP, responsáveis por adotar uma postura positiva e crítica, mas não defensiva. Nesta fase, sugere-se que a sessão de *Brainstorming* seja feita com o objetivo de identificar tantas causas quanto possíveis, lembrando que as causas também podem estar relacionadas a fatores humanos, falhas em hardware e softwares.

Tabela 2.3: Parâmetro, palavras-guia e desvios para HAZOP de Processos Contínuos.

Parâmetro	Palavra-Guia	Desvio
Fluxo	Nenhum	Nenhum fluxo
	Menos	Menos fluxo
	Mais	Mais fluxo
	Reverso	Fluxo reverso
	Também	Contaminação
Pressão	Menos	Pressão baixa
	Mais	Pressão alta
Temperatura	Menos	Temperatura baixa
	Mais	Temperatura alta
Nível	Menos	Nível baixo
	Mais	Nível alto
Viscosidade	Menos	Viscosidade baixa
	Mais	Viscosidade alta
Reação	Nenhum	Nenhuma reação
	Menos	Reação incompleta
	Mais	Reação descontrolada
	Reverso	Reação reversa
	Também	Reação secundária

Fonte: Adaptado de Kletz (1999).

A próxima etapa do estudo HAZOP consiste na **Determinação das Consequências do Desvio (Passo 4)**. Utilizando um procedimento similar ao da determinação das causas dos

desvios, o time do HAZOP deve analisar cuidadosamente as consequências geradas pelos desvios identificados, podendo ser consequências relacionadas com a segurança de processos ou com problemas operacionais.

Em seguida, o time do HAZOP deve realizar a **Identificação das Camadas de Proteção ou Salvaguardas (Passo 5)** existentes. As camadas de proteção, ou também denominadas de salvaguardas, podem ser alarmes, procedimentos operacionais, válvulas de alívio de pressão e diques de contenção. Para cada desvio deve-se verificar a existência de dispositivos que inibem ou reduzem o risco de ocorrência do evento indesejado, que neste caso é o desvio do processo e suas consequências. Nos estudos HAZOP, percebe-se uma variação a respeito de como e quando as salvaguardas existentes são utilizadas. Por definição da metodologia, a falha de salvaguardas não é considerada como causa de cenários perigosos, ou seja, a existência de camadas de proteção é levada em conta na categorização da frequência de ocorrência do evento. Entretanto, a aplicação correta da metodologia requer que as consequências do evento sejam avaliadas sem a consideração de quaisquer salvaguardas, ou seja, encontra-se as consequências com uma maior criticidade e, posteriormente, é avaliado se é preciso adicionar medidas complementares para garantir a prevenção ou mitigação do desvio.

Um dos passos mais importantes realizados pelo time do HAZOP durante a aplicação desta técnica de análise de riscos é a **Avaliação de Riscos (Passo 6)**. Originalmente, pouco ou nenhuma avaliação de risco era executada na técnica HAZOP, que tinha o objetivo apenas de identificar os perigos e problemas de operabilidade. Entretanto, com o passar dos anos, diversas empresas sentiram a necessidade de propor uma avaliação que abarcasse o nível de risco das causas/consequências dos desvios encontrados nesta metodologia. A avaliação de risco executada no estudo HAZOP é qualitativa e realizada por uma matriz de risco montada com uma composição de diversas categorias de magnitude para frequência e severidade. As categorias podem representar riscos de danos às pessoas, ao ambientais, ao patrimônio/continuidade operacional e à imagem da empresa. Vale ressaltar que o processo em que se estima a frequência e severidade depende fortemente da experiência do time do HAZOP e que as incertezas no nível de risco tendem a crescer a medida que se utiliza grupos pouco experientes nesta técnica. Apresenta-se nas Tabelas 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 as categorias típicas de frequência, severidade, matriz de risco e a categorização do risco, respectivamente.

Tabela 2.4: Categorias de frequência.

Categoria de Frequência	Denominação	Descrição
5	Frequente	Evento pode ocorrer várias vezes durante a vida útil da planta industrial.
4	Provável	Evento pode ocorrer mais de uma vez durante a vida útil da planta industrial.
3	Pouco provável	Talvez ocorra até 1 vez durante a vida útil da planta industrial.
2	Remota	Apesar de existirem registros históricos de ocorrência, não espera-se que o evento irá ocorrer durante a vida útil da planta industrial.
1	Extremamente remota	Não existem registros históricos de ocorrência. Apesar de ser conceitualmente possível, não é esperado que ocorra durante a vida útil da planta industrial.

Fonte: Rausand (2011).

Tabela 2.5: Categorias de Severidade.

Categoria de severidade	Denominação	Consequência Pessoas	Consequência Patrimônio	Consequência Ambiental
5	Catastrófica	Acidente com 01 fatalidade público externo ou mais de uma fatalidade da força de trabalho	Perca total do sistema com efeitos/danos a sistemas externos.	Danos ao meio ambiente com período de reconstituição maior que 5 anos.
4	Crítica	Acidente com 01 fatalidade da força de trabalho.	Perca de parte do sistema de produção com parada de produção por meses.	Danos ao meio ambiente com período de reconstituição de 2 a 5 anos.
3	Média	Lesões graves com afastamento prologando para tratamento médico ou incapacitação	Danos materiais consideráveis com parada de produção por semanas.	Danos ao meio ambiente com período de reconstituição menor que 2 anos.
2	Marginal	Lesões graves com afastamento para tratamento médico de curto período.	Danos materiais leves com pequena influência na produção.	Impacto de magnitude leve com duração pequena (menor que 1 mês)
1	Desprezível	Pequenas lesões, irritações ou perturbações leves.	Danos materiais pequenos com custos desprezíveis.	Impacto de magnitude leve ou desprezível para o meio ambiente.

Fonte: Adaptado de Rausand (2011).

Tabela 2.6: Matriz de risco.

			Categoria de Frequência				
			I	II	III	IV	V
			Extremamente remota	Remota	Pouco provável	Provável	Frequente
Categoria de Severidade	V	Catastrófica	Moderado (M)	Moderado (M)	Não Tolerável (NT)	Não Tolerável (NT)	Não Tolerável (NT)
	IV	Crítica	Tolerável (T)	Moderado (M)	Moderado (M)	Não Tolerável (NT)	Não Tolerável (NT)
	III	Média	Tolerável (T)	Tolerável (T)	Moderado (M)	Moderado (M)	Não Tolerável (NT)
	II	Marginal	Tolerável (T)	Tolerável (T)	Tolerável (T)	Moderado (M)	Moderado (M)
	I	Desprezível	Tolerável (T)	Tolerável (T)	Tolerável (T)	Tolerável (T)	Moderado (M)

Fonte: Adaptado de Rausand (2011).

Tabela 2.7: Categorias de Risco.

Categoria de Risco	Descrição do nível de controle necessário
1 - Tolerável (T)	Não há necessidade de medidas adicionais para redução dos risco.
2 - Moderado (M)	Deve-se avaliar medidas adicionais com o objetivo de obter-se uma redução dos riscos. Utiliza-se o princípio ALARP - “ <i>As Low As Reasonably Practicable</i> ”.
3 - Não Tolerável (NT)	Deve-se obrigatoriamente propor medidas adicionais de controle, uma vez que os controles existentes são insuficientes para manter o risco dentro dos limites (região tolerável ou moderado(ALARP)).

Fonte: Adaptado de Rausand (2011).

Com a definição do nível de risco de cada consequência cabe ao time do HAZOP realizar às **Propostas de Melhorias (Passo 7)**. Nesta fase, as melhorias, que podem ser alterações no projeto ou criação de um novo procedimento operacional, devem objetivar a prevenção da ocorrência dos desvios e/ou mitigação de suas consequências, sendo, portanto, propostas com base nos níveis de riscos identificados/categorizados na etapa anterior. Para

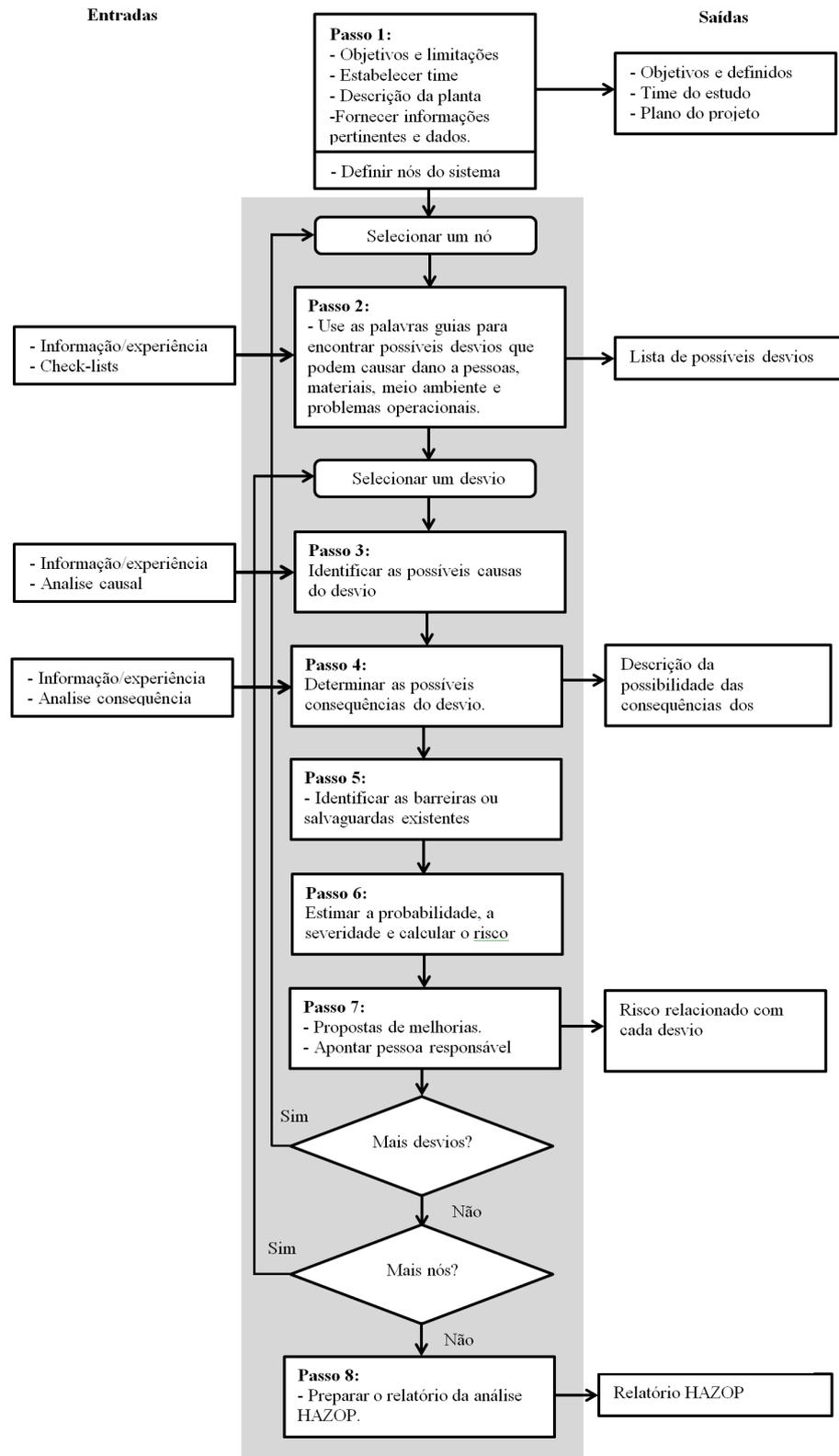
definir a necessidade, ou não, da implementação de melhorias, deve-se avaliar os critérios de tolerabilidade e aceitabilidade do risco, que geralmente variam de empresa para empresa. Segundo Kletz (1999), uma estratégia bastante utilizada na indústria de processo como critério de risco é o princípio “Tão Baixo quanto razoavelmente praticável” (ALARP – do Inglês, “As Low As Reasonably Practicable”). Na prática ALARP, melhorias devem ser obrigatoriamente propostas para os riscos categorizados como Inaceitáveis, ao passo que, para riscos Toleráveis (região ALARP) e Aceitáveis, deve-se considerar medidas para redução do risco sempre que for razoavelmente praticáveis, ou seja, até que os custos despendidos nas medidas de redução de risco se tornem desproporcionais aos benefícios adquiridos por tais medidas.

Por fim, o último passo da metodologia HAZOP, geralmente realizado por meio da **Elaboração do relatório do estudo (Passo 8)**, consiste na documentação e registro das atividades e conclusões do estudo. Neste relatório, deve-se adicionar informações a respeito do sistema avaliado, dos integrantes do time do HAZOP e de todas as premissas utilizadas durante o estudo. Ainda, sugere-se que todos os desvios avaliados sejam documentados neste relatório, garantindo assim que as considerações propostas pelo time que realizou o estudo cheguem aos profissionais do projeto e operação da planta de processo avaliada. Além disso, algumas empresas elaboram uma lista de pendência/ações, que geralmente é anexada ao relatório HAZOP e tem como objetivo acompanhar a implementação das medidas de redução de risco propostas pelo time.

Em teoria, a metodologia HAZOP é bastante simples e de fácil implementação, porém, para atingir melhores resultados, os passos apresentados devem ser seguidos cuidadosamente. Uma prática comum na indústria consiste em elaborar uma planilha para que sejam adicionados todos os desvios, tipicamente inseridos nas linhas da planilha, e os resultados de avaliação de todas as etapas do estudo, que são adicionados, tipicamente em colunas (RAUSAND, 2011, ERICSON, 2015).

Apresenta-se nas Figuras 2.9 e 2.10, respectivamente, uma visão geral dos passos da metodologia HAZOP e um modelo típico de planilha aplicado durante o estudo.

Figura 2.9: Visão geral das etapas do estudo do HAZOP.



Fonte Adaptado de Rausand (2011).

Figura 2.10: Exemplo de planilha HAZOP.

Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Freq.	Sev.	Risco	Recomendações	Resp.	Prazo	Observações
Baixa Pressão	Parada de Bomba	Indicador de Pressão	Parada operacional	3	1	3	Procedimento para manutenção da bomba	Equipe de manutenção	Ago/17	-
Alta Pressão	Falha da válvula de controle (Falha aberta)	Válvula de segurança (PSV)	Ruptura de tubulação ou vazamento nas juntas	2	4	8	- Procedimento para manutenção válvula de controle. - Instalação de válvula PSV redundante	-Equipe de manutenção -Equipe de Engenharia	-Ago/17 -Nov/17	Verificar válvula sobressalente no almoxarifado
Baixa Vazão	Estrangulamento de Válvula de controle	Indicador de Vazão	Parada operacional	2	1	2	Procedimento para manutenção válvula.	Equipe de manutenção	Ago/17	-

Segundo Rausand (2011), o estudo HAZOP tem sido utilizado com grande sucesso nas indústrias químicas e de petróleo para avaliação de processos, objetivando a obtenção de uma planta mais segura, confiável e eficiente. Ainda, o autor pontua que a técnica HAZOP se tornou um padrão em diversas companhias no projeto de novos sistemas, e pode ser adaptada para utilização nas mais variadas áreas de aplicação.

Quintella (2011), por exemplo, utiliza a metodologia HAZOP para avaliação de riscos na área de serviço de saúde, avaliando as operações de Processamento, Estoque e Distribuição de bolsas de sangue na unidade do Hemocentro da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Este estudo foi capaz de identificar diversos riscos relacionados à biossegurança, causados por falhas técnicas e por falhas humanas, com cerca de 60% dos riscos identificados categorizados como crítico à saúde dos funcionários e ao meio ambiente.

Crawley & Tyler (2015) nos mostram que a análise dos problemas de segurança utilizando a técnica HAZOP é, por definição e origem, qualitativa, embora, cada vez mais as indústrias utilizem este processo de avaliação de risco para categorizar os diferentes níveis de risco encontrados no estudo. Tal categorização auxilia o time do HAZOP no processo de tomada de decisão, já que é possível “enxergar” de maneira mais clara os desvios de processo que possuem um maior nível de risco e que, a princípio, devem ser tratados com prioridade por meio da proposição de medidas que reduzem e/ou mitigam tais riscos. Ainda, os autores pontuam que a qualidade dos resultados do HAZOP depende fortemente da experiência do time que executa o estudo. Em alguns casos, a inexperiência do grupo, aliada à falta de conhecimento do processo analisado, pode criar grandes incertezas e imprecisões na categorização dos riscos.

Tal fato pode prejudicar seriamente a implantação de medidas para redução do risco, uma vez que o risco estimado pode ter sido subestimado ou superestimado no processo de avaliação.

Tendo em vista os problemas de imprecisão e incertezas na categorização dos riscos na metodologia HAZOP convencional, a presente pesquisa terá como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia HAZOP semiquantitativa que, por meio da utilização da teoria dos conjuntos *Fuzzy*, modela as categorias linguísticas utilizadas pelo time do estudo e incorpora valores quantitativos de frequência e severidade na avaliação de risco. Objetiva-se assim que, com a utilização de valores numéricos, obtenha-se resultados mais robustos, já que o processo de avaliação de risco não dependerá somente da expertise do time do HAZOP.

2.3 Lógica *Fuzzy*

A lógica *Fuzzy*, também conhecida como lógica Nebulosa, inicialmente introduzida pelo filósofo e lógico Jan Lukasiewicz em 1930 e consolidada no ano de 1965 pelo cientista Lofti A. Zadeh, tem a capacidade de modelar conceitos vagos e pode ser utilizada para representar informações subjetivas do dia-a-dia de forma matemática. A teoria dos conjuntos *Fuzzy* tem grande aplicação quando se deseja modelar o raciocínio humano, sendo este capaz de tomar decisões em ambientes com grande incerteza e imprecisão. Ao contrário da lógica clássica, baseada no conceito bivalente no qual um objeto pertence ou não a um conjunto, a lógica nebulosa considera que um elemento pode pertencer a mais de um conjunto, possuindo assim graus de pertinência em cada um deles. De maneira geral, considera-se na lógica *Fuzzy* que um elemento pertence a um conjunto com determinado grau de pertinência variante entre 0 e 1 (ROSS, 2010).

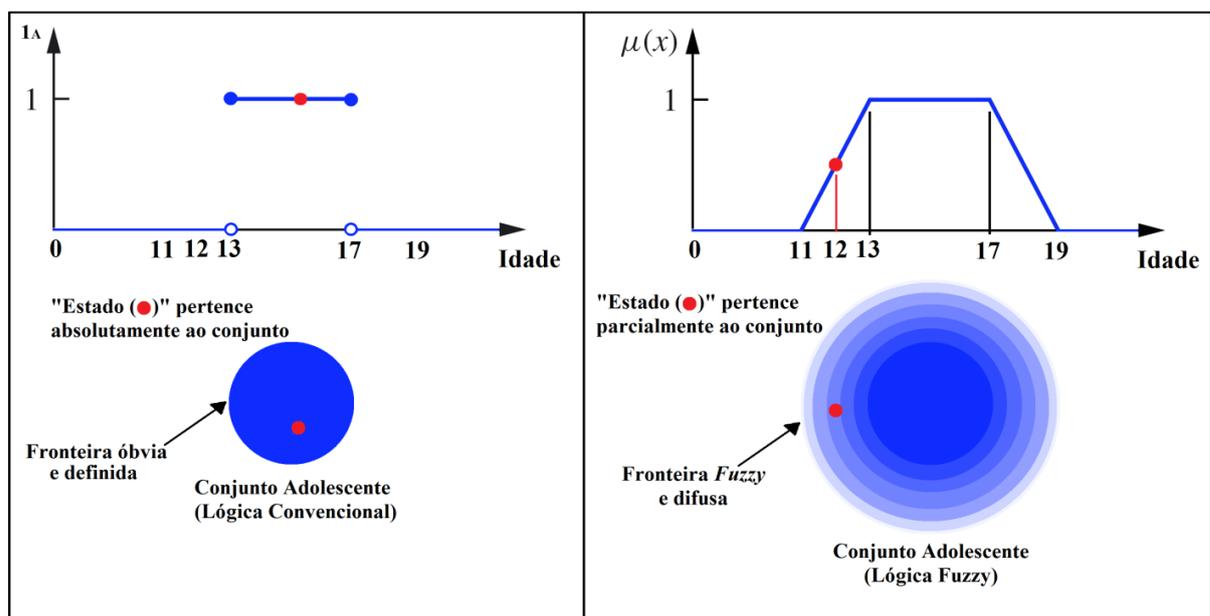
Zadeh (1965) apresenta que um conjunto *Fuzzy* A , relacionado ao universo de discurso Ω , pode ser representado por uma função de pertinência $\mu_A : \Omega \rightarrow [0,1]$. A função de pertinência determina um grau de pertinência $\mu_A(x)$ para cada elemento x pertencente ao universo de discurso Ω . Diante disso, constata-se que a função de pertinência indica o grau de compatibilidade de x com o conceito expresso por A , conforme apresentado na Equações 2.1.

$$\begin{aligned} \mu_A(x) = 1 & \text{ indica que } x \text{ é completamente compatível com } A \\ \mu_A(x) = 0 & \text{ indica que } x \text{ é completamente incompatível com } A \end{aligned} \tag{2.1}$$

$0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$

Para exemplificar a diferença da lógica clássica e da lógica Nebulosa, Sandri e Correa (1999) apresentam um exemplo relacionado à idade de um indivíduo e se o mesmo é, ou não, considerado “adolescente”. Neste exemplo, para a lógica convencional, considera-se a pessoa como adolescente se a mesma possui uma idade entre 13 e 17 anos, ou seja, uma pessoa com a idade de 12 anos e 11 meses não poderia ser considerada adolescente, visto que estaria fora dos limites definidos pelo conjunto. Já com a utilização dos conjuntos *Fuzzy*, pode-se, por exemplo, considerar que uma pessoa com idade entre 13 e 17 anos é adolescente, acima de 19 ou abaixo de 11 não é considerado adolescente, e no intervalo 11-13 anos e 17-19 anos pode-se adicionar funções de pertinência que consideram mais adolescente quanto mais próximo de 13 e 17 anos. Apresenta-se na Figura 2.11 uma ilustração deste exemplo.

Figura 2.11: Diferença entre conjuntos convencionais e conjuntos *Fuzzy*.

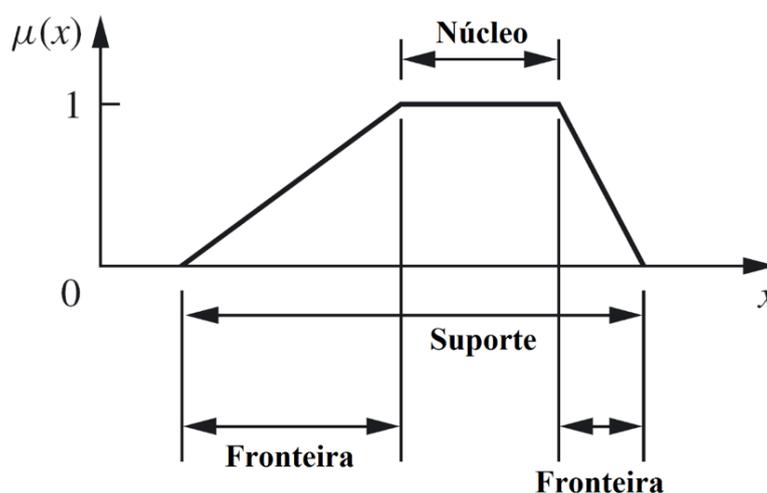


Fonte: adaptado de Sandri & Correa (1999).

A função que define o grau de pertinência, ou grau de verdade, para cada elemento do universo de discurso em um conjunto *Fuzzy* é a função de pertinência. Esta função é constantemente associada a rótulos linguísticos e possui o valor de saída no intervalo de 0 a 1. A estrutura típica de uma função de pertinência, apresentada na Figura 2.12, pode ser definida em três regiões básicas: núcleo, fronteira e suporte. O núcleo é a região em que os elementos do universo de discurso são completamente pertencentes ao conjunto *Fuzzy*, ou seja, elementos

que a função de pertinência é $\mu_A(x) = 1$. Já a região de fronteira é caracterizada por elementos que possuem o grau de pertinência diferente de zero, porém não pertencem completamente ao conjunto *Fuzzy*. Para os elementos pertencentes a essa região, a função de pertinência nos fornece de $0 < \mu_A(x) < 1$. Por fim, temos a região de suporte, em que os elementos do universo de discurso possuem grau de pertinência diferente de zero, $\mu_A(x) > 0$ (ROSS, 2010; THE MATHWORKS, 2017).

Figura 2.12: Núcleo, Fronteira e suporte das funções *Fuzzy*.

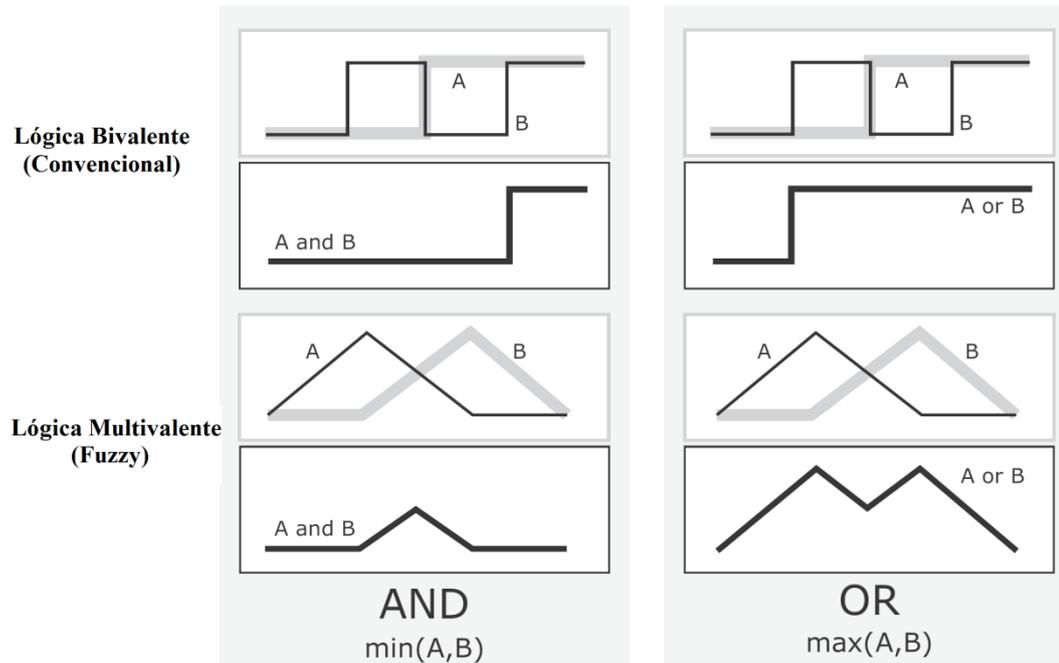


Fonte: Adaptado de Ross (2010).

Segundo Marro *et al* (2010) a lógica convencional, também conhecida como lógica booleana, atua nos extremos dos conjuntos *Fuzzy* com os graus de pertinência de 1 (completamente verdadeiro) e 0 (completamente falso), ou seja, pode-se considerar que a lógica *Fuzzy* é uma generalização da lógica convencional. Diante disso, os operadores *Fuzzy* foram desenvolvidos para que, em caso de sua utilização com a lógica convencional, os resultados fossem preservados. As operações entre os conjuntos *Fuzzy* são de grande importância para a lógica *Fuzzy*, posto que os processos de inferência nebulosa são baseados em operações entre conjuntos. Assume-se que o operador E (AND) da lógica *Fuzzy*, responsável por realizar a operação A AND B, considera o valor mínimo entre A e B, garantindo assim que os resultados estejam limitados ao intervalo (0,1). Já para o operador OU (OR), que realiza a operação A OR B, considera-se o valor máximo entre A e B. Para ilustrarmos este exemplo, apresenta-se na

parte superior da Figura 2.13 as operações AND e OR aplicadas com a lógica convencional e, na parte inferior da mesma figura, aplicadas com a lógica *Fuzzy* (ZADEH, 1965).

Figura 2.13: Os operadores lógicos aplicados na lógica clássica e na lógica *Fuzzy*.



Fonte: Adaptado de The Mathworks (2017).

O uso da lógica *Fuzzy* nas aplicações de engenharia envolvem a utilização das regras *Fuzzy* do tipo Se-Então (“*if-then*”), utilizadas para operar os conjuntos *Fuzzy* com o objetivo de obter uma conclusão da proposição lógica. As regras devem ser criadas a partir do conhecimento de um especialista a respeito do sistema em que se aplica a lógica nebulosa. (MOZELLI, 2008). A regra mais simples que pode ser utilizada assume a seguinte forma:

$$\text{se } x \text{ é } A \text{ então } y \text{ é } B \quad (2.2)$$

em que A e B são variáveis linguísticas e os valores x e y são elementos pertencentes ao universo de discurso X e Y. A parte “se” da regra, ou “x é A”, é denominada antecedente enquanto a parte “então”, ou seja, “y é B” é chamada de conseqüente (conclusão).

O mecanismo de utilização das regras *Fuzzy* engloba a concepção tradicional da lógica booleana. Na concepção tradicional, uma regra Se-Então é ativada somente quando a variável premissa x é exatamente igual ao antecedente, ou seja, a inferência produzida será: y = conseqüente. Já na abordagem da lógica nebulosa, que é uma generalização da lógica booleana, temos que a regra Se-Então é ativada quando há um grau de similaridade, diferente

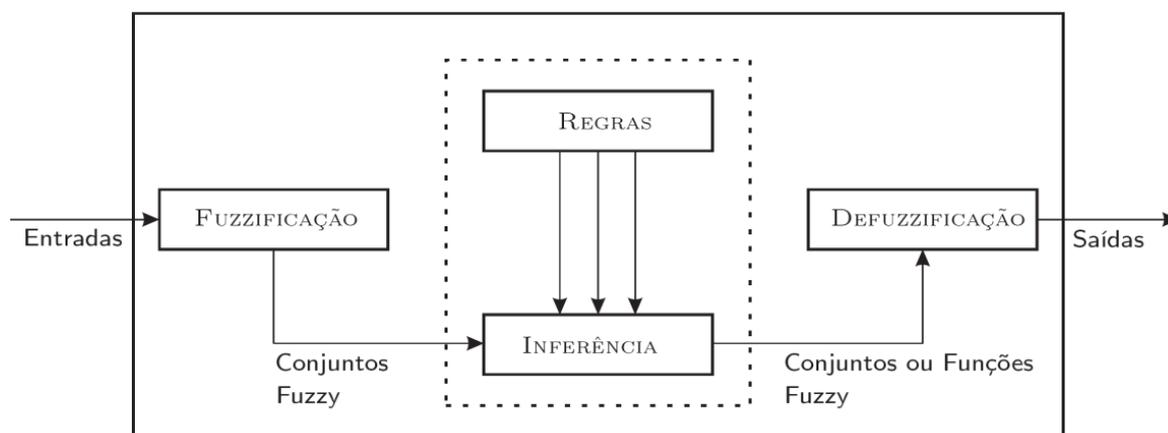
de zero, entre a variável premissa e o antecedente. Neste caso, pode-se inferir uma conclusão que preserve algum grau de similaridade com o consequente (MOZELLI, 2008). Nota-se, que as regras podem possuir mais de um antecedente, conforme apresentado a seguir.

$$\text{se } x \text{ é } A \text{ e } z \text{ é } C \text{ então } y \text{ é } B \quad (2.3)$$

A regra com dois antecedentes permite uma conclusão mais sofisticada, dado que a conclusão (consequente) tem dependência com a similaridade de x em A e a similaridade de z em C . Por exemplo, considere a proposição de regras a respeito de uma avaliação de risco, sendo este uma composição de frequência e severidade de um evento perigoso. Considerando as categorias de Frequência, Severidade e Risco apresentadas no item 2.2.5 do presente trabalho, uma regra com múltiplos antecedentes para inferir sobre o risco presente pode ser: se a Frequência é remota e a Severidade é crítica, então o Risco é moderado.

O sistema de inferência *Fuzzy* é um conjunto de ferramentas que, por meio da utilização das regras previamente definidas, dos conceitos de conjuntos *Fuzzy*, das variáveis linguísticas e do raciocínio aproximado, avalia as entradas com o objetivo de obter conclusões. Este processo é estruturado pelo Modelo de Inferência, escolhido de acordo com o problema a ser resolvido para garantir o melhor processamento das informações. Dentre os vários modelos desenvolvidos na literatura, o método Mandami, criado em 1975 na Universidade de Londres (Reino Unido) pelo professor Ebrahim Mamdani, apresenta ótimos resultados quando se deseja representar a experiência humana da vida real, ou seja as variáveis manipuladas no presente trabalho (MARRO, 2010). O sistema de inferência *Fuzzy* é ilustrado na Figura 2.14.

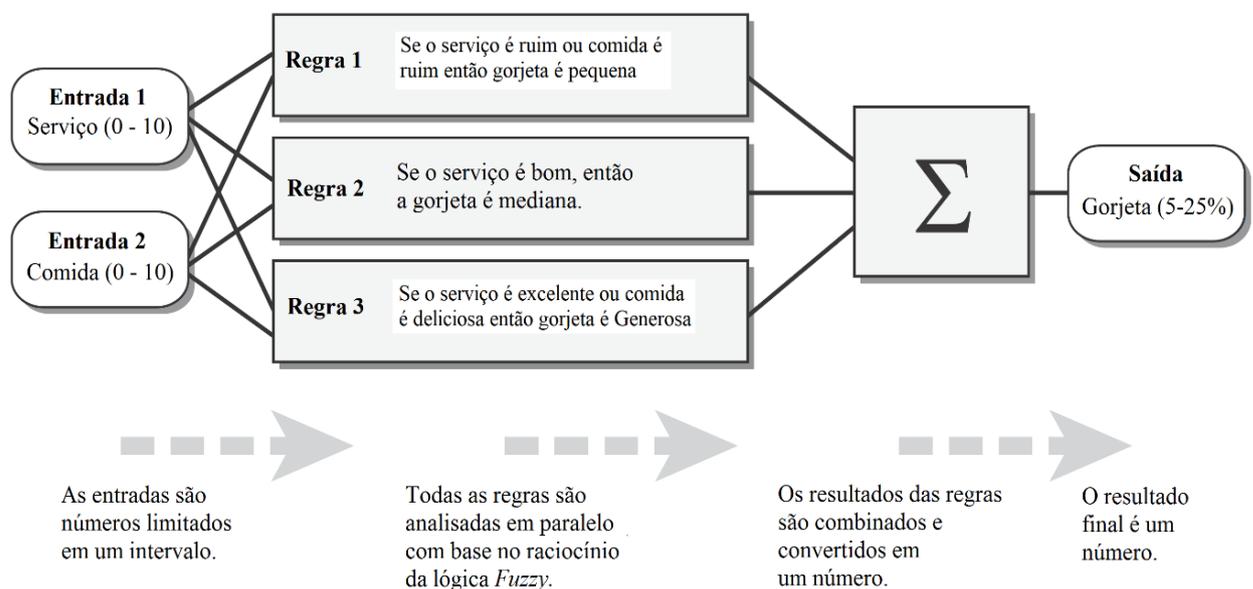
Figura 2.14: Diagrama esquemático do sistema de inferência *Fuzzy*.



Fonte: Adaptado de Mozelli (2017).

Segundo o The MathWorks, (2017), o sistema de inferência pelo método Mandami considera que o processo de raciocínio *Fuzzy* pode ser dividido em cinco etapas distintas, sendo elas: (1) Fuzzificação das entradas, (2) Aplicação dos operadores *Fuzzy*, (3) Uso do método de implicação das regras *Fuzzy*, (4) Agregação das saídas e (5) Defuzzificação. Para melhor entendimento das etapas apresenta-se, nos itens 2.3.1 a 2.3.5, o descritivo de cada uma delas, bem como um exemplo de sua aplicação. O exemplo escolhido baseia-se no uso dos conjuntos *Fuzzy* para avaliar o percentual de gorjeta a ser dado em um restaurante a partir da qualidade do serviço prestado e da comida. Neste caso, o processo de inferência utilizará três regras do tipo Se-Então e três variáveis linguísticas (duas entradas e uma de saída). As variáveis de entrada Serviço e Comida possuem universo de discurso variando de 0 a 10, ou seja, a quantificação de ambos atinge o valor máximo em 10 e mínimo em 0. Apresenta-se na Figura 2.15 uma visão geral da estrutura básica deste exemplo (THE MATHWORKS, 2017).

Figura 2.15: Visão geral do processo de inferência em sistemas nebulosos.



Fonte: Adaptado de The Mathworks (2017).

2.3.1 Fuzzificação das entradas

No processo de Fuzzificação das entradas encontra-se, por meio das funções de pertinência, o grau de pertinência de cada entrada com cada conjunto *Fuzzy*. Tendo em vista que muitas variáveis manipuladas no dia-a-dia são vagas e possuem alto grau de incerteza e imprecisão, o uso do processo de fuzzyficação permite que tais variáveis se transformem em

números *Fuzzy*. A transformação para o universo *Fuzzy* garante que as incertezas e imprecisões quanto aos valores das variáveis, variantes entre 0 (não pertence ao conjunto nebuloso) e 1 (pertence totalmente ao conjunto nebuloso), sejam representadas por suas funções de pertinência.

No exemplo apresentado no The MathWorks (2017) e ilustrado na Figura 2.15, três regras são propostas baseadas na transformação das entradas em diferentes conjuntos linguísticos *Fuzzy* relacionados à avaliação de um restaurante: **Serviço** é ruim, **Serviço** é bom, **Serviço** é excelente, **Comida** é ruim e **Comida** é deliciosa. Apresenta-se na Figura 2.16 a transformação da variável de entrada Comida em uma variável *Fuzzy*. Nota-se que, neste exemplo, a comida é avaliada em 8 em uma escala de 0 a 10 e, de acordo com a função de pertinência deliciosa, este valor corresponde a um grau de pertinência de 0,7 ao conjunto *Fuzzy* deliciosa.

Figura 2.16: Visão geral do processo de inferência em sistemas nebulosos.



Fonte: Adaptado de The Mathworks (2017).

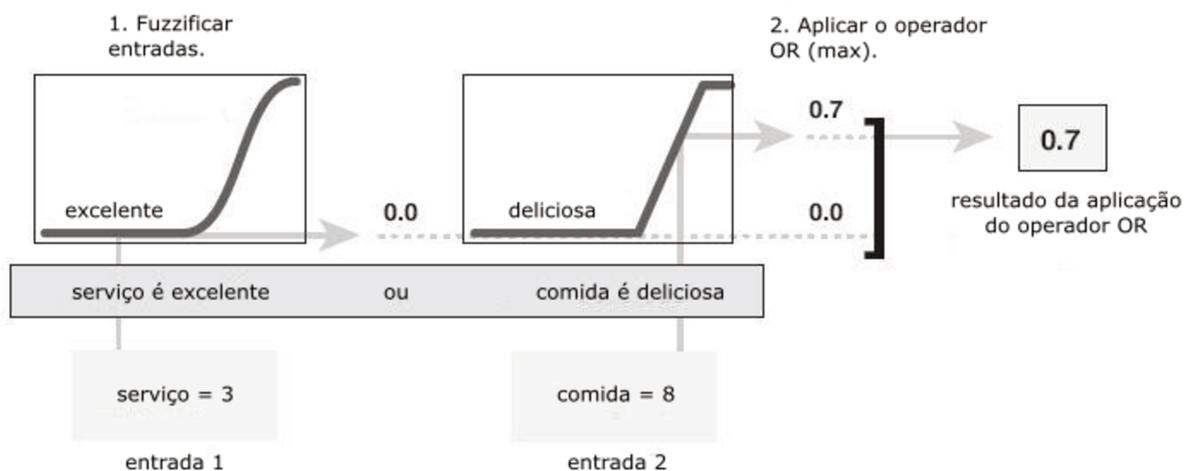
2.3.2 Aplicação dos operadores *Fuzzy*

Em casos em que o antecedente de uma determinada regra *Fuzzy* Se-Então é composto por mais de uma parte, deve-se utilizar operadores *Fuzzy* com a finalidade de obter um único número que o represente. Aplica-se, assim, os operadores *Fuzzy* do tipo E (AND) e OU (OR) nos antecedentes das regras, ou seja, graus de pertinência de cada variável de entrada

obtidos no processo de Fuzzyficação. Conforme apresentado no item 4.3, o operador E (AND) de dois conjuntos *Fuzzy* considera o valor mínimo entre eles, enquanto o operador OU (OR) considera o valor máximo.

Apresenta-se na Figura 2.17 a obtenção de um resultado único para uma regra composta por dois antecedentes: Serviço é excelente e Comida é deliciosa. Neste exemplo a qualidade do serviço possui grau de pertinência de 0,0 enquanto a comida possui grau de 0,7, nos respectivos conjuntos *Fuzzy* excelente e deliciosa. Diante disso, o operador *Fuzzy* OU (OR) seleciona o valor máximo entre o grau de pertinência dos dois antecedentes, sendo este 0,7.

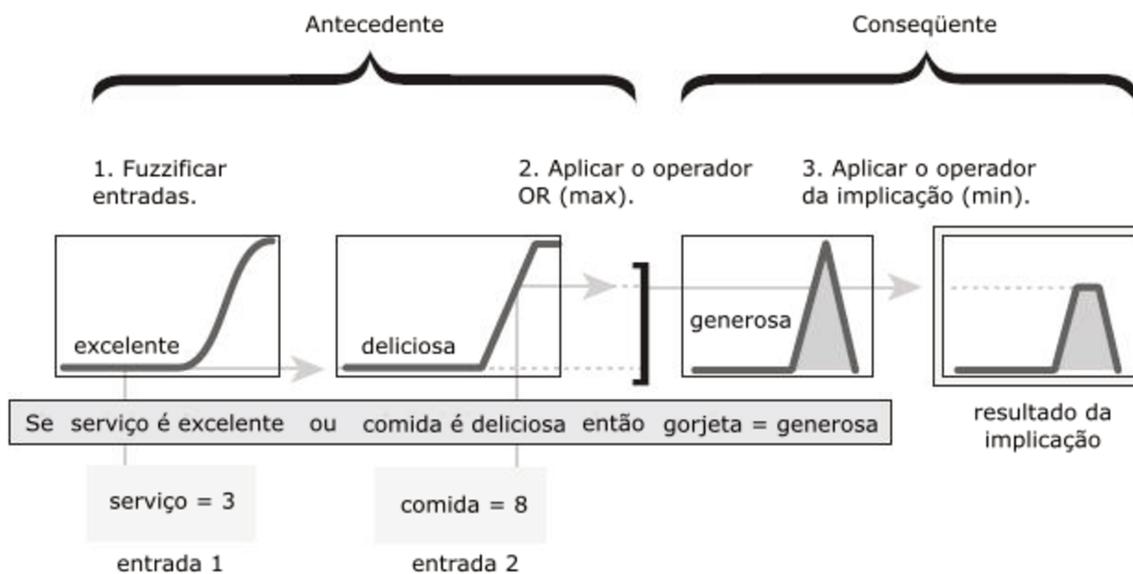
Figura 2.17: O uso do operador nebuloso OR.



Fonte: Adaptado de The Mathworks (2017).

2.3.3 Implicação das regras *Fuzzy*

A implicação das regras *Fuzzy* baseia-se na utilização dos antecedentes, que são conjuntos nebulosos de entrada representados por seu grau de pertinência, para que se obtenha, por meio de cada regra, um conjunto nebuloso de saída. Este processo deve ser aplicado à todas as regras propostas para o sistema *Fuzzy* avaliado. A Figura 4.18 ilustra a implicação de uma das regras do exemplo de avaliação *Fuzzy* do percentual de gorjeta a ser dado em um restaurante. Percebe-se pela figura que o operador de implicação min (mínimo) foi utilizado e o grau de pertinência resultado da operação no antecedente é transmitido ao consequente, descartando assim parte da função de pertinência generosa.

Figura 2.18: Aplicação do operador de implicação *min*.

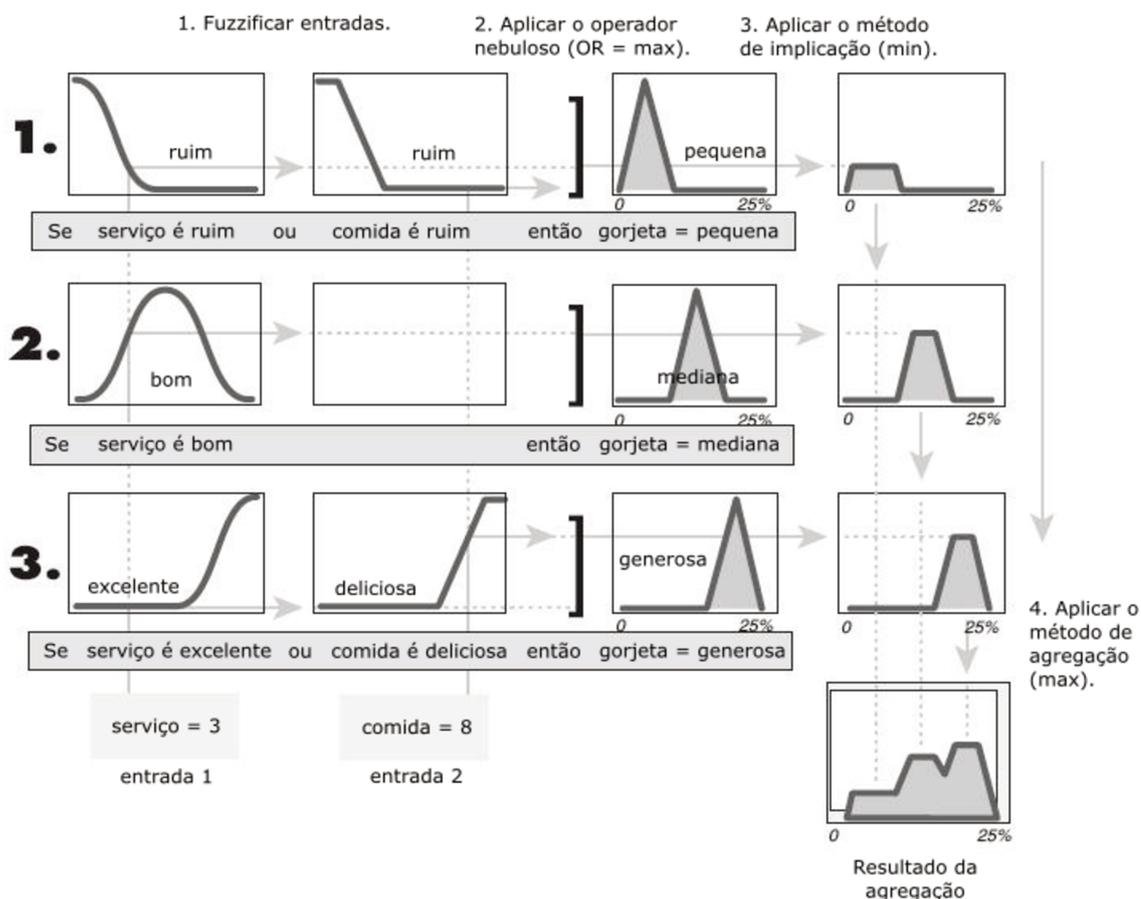
Fonte: Adaptado de The Mathworks (2017).

Ainda, há de se ressaltar que em alguns casos utiliza-se um peso (número entre 0 e 1) aplicado ao antecedente. A possibilidade de utilização de pesos permite que a influência dos antecedentes nas saídas seja ponderada, garantindo assim uma melhor adequação do método *Fuzzy* para modelagem de sistemas reais. De maneira geral, quando não se deseja ponderar os antecedentes por meio de pesos, utiliza-se o peso com valor de 1 em todos antecedentes.

2.3.4 Agregação das saídas

Na avaliação de sistemas com a lógica *Fuzzy* deve-se tomar decisões fundamentadas no processo de inferência nebulosa, que tem seu resultado baseado no teste de todas as regras de inferência. Assim, os conjuntos de saída *Fuzzy* obtidos em cada regra são agregados de forma que se obtenha um resultado de saída único.

O processo de agregação tem como entrada todas as funções de saídas truncadas, resultado da implicação de cada regra e do uso dos operadores *Fuzzy*. Tal processo é ilustrado na Figura 2.19. Percebe-se que cada uma das três regras tem como saída um conjunto *Fuzzy* relacionado à gorjeta. Os valores de saída de cada regra são combinados pelo operador max (máximo), que agrega os valores máximos de cada função de pertinência, gerando assim um conjunto de saída único para gorjeta.

Figura 2.19: Aplicação do método de agregação *max*.

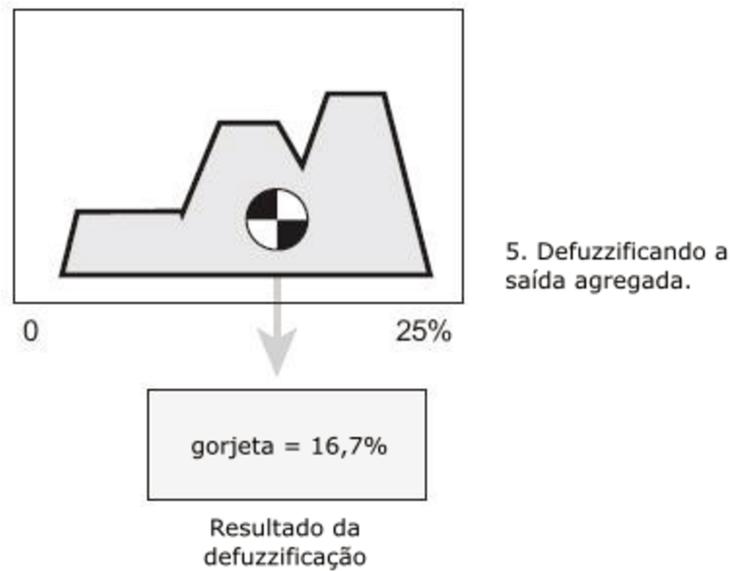
Fonte: Adaptado de The Mathworks (2017).

2.3.5 Defuzzificação

Após o processo de agregação das saídas, utiliza-se o processo de Defuzzificação, que tem como objetivo transformar o valor da variável linguística de saída em uma saída numérica que melhor represente os valores *Fuzzy* inferidos. Existem vários métodos de Defuzzificação, entretanto o método mais comum é a técnica do Centro-da-Área que, segundo Shaw e Simões (2007), apresenta ótimos resultados quando utilizada para Defuzzificar conceitos e variáveis com alto grau de incerteza e imprecisão.

No método Centro-da-Área, também conhecido como Centro-de-Gravidade, calcula-se o centroide da área obtida pela agregação das saídas *Fuzzy* de todas as regras. Para ilustrar o processo de Fuzzificação, apresenta-se na Figura 4.20 o uso do método Centro-da-Área na determinação do percentual final de gorjeta a ser dada ao restaurante, sendo este percentual um produto da avaliação *Fuzzy* do sistema.

Figura 2.20: O processo de defuzzificação.



Fonte: Adaptado de The Mathworks (2017).

2.3.6 Conjuntos *Fuzzy* aplicados na avaliação de segurança

As técnicas de avaliação de risco apresentam sempre em seus resultados um grau de incerteza associado. Tal incerteza pode ser gerada por diferentes causas, tais como o uso de modelos inadequados, mal interpretação do sistema avaliado, falta de conhecimento a respeito do sistema e falhas na identificação dos perigos em potencial. Nas técnicas de avaliação de risco quantitativas, as principais incertezas são causadas pela qualidade dos dados de falha e confiabilidade utilizados. Diversos profissionais de segurança recomendam que sempre seja realizada uma análise das incertezas juntamente com a análise quantitativa de risco, de modo que os resultados obtidos na técnica levem em conta as possíveis fontes de incertezas dos dados de entrada dos modelos (RAUSAND, 2011).

No que se refere à avaliação de risco qualitativa, tal como o Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP), as principais fontes de incerteza advêm da possível falta de experiência dos participantes do estudo e da forma com que o conhecimento humano é traduzido em expressões linguísticas. Além disso, os próprios termos linguísticos utilizados nas metodologias qualitativas são imprecisos, vagos e incertos. Uma das formas de reduzir as incertezas nos resultados de análise de risco qualitativa é utilizar os conceitos dos conjuntos *Fuzzy*, já que possuem a capacidade de modelar os termos imprecisos e vagos que são utilizados nos estudos de segurança. (STAPELBERG, 2009; RAUSAND, 2011).

Diversos estudos evidenciam os benefícios da utilização dos conceitos da lógica nebulosa nas análises de risco industrial. Sii, Wang & Ruxton (2001), por exemplo, nos mostram que as técnicas convencionais de avaliação de risco se mostram pouco eficazes quando aplicadas no estágio inicial do projeto de sistemas Offshore, tais como plataformas de exploração e navios de produção de petróleo. Diante disso, os autores utilizam os conjuntos *Fuzzy* que, por meio da definição de termos linguísticos de Severidade e Frequência, conseguem modelar os níveis de Risco de maneira subjetiva. Para ilustrar a aplicação dos conjuntos nebulosos na avaliação de risco, os autores fornecem um exemplo que avalia o nível de risco de um incêndio causado por vazamento de óleo na sala de máquinas de um navio de armazenamento de petróleo. No estudo o processo de inferência *Fuzzy* é baseado nas variáveis de entrada Severidade e Frequência, em trinta regras do tipo Se-Então e em uma variável de saída, sendo esta o Risco. Como conclusão, o estudo evidencia os bons resultados do uso da teoria dos conjuntos *Fuzzy* na obtenção dos níveis de risco no projeto dos sistemas marítimos que, em estado inicial, são comumente sujeitos a grandes incertezas e imprecisões.

Já Markowski *et al.* (2009) utilizaram os conceitos da lógica *Fuzzy* nas técnicas de análise de árvore de falha e eventos. Neste contexto, os números exatos da metodologia tradicional de Análise de Falhas e Eventos foram substituídos por números *Fuzzy* através do processo de Fuzzificação e, por meio do processo de inferência *Fuzzy*, a probabilidade de ocorrência de cada evento perigoso foi calculada. Ainda, os autores apresentam um estudo de caso com o comparativo entre a técnica convencional e a técnica *Fuzzy* aplicadas na análise de ruptura de um tanque de armazenamento de Iso-Butano. Por fim, pode-se evidenciar neste estudo os resultados mais realistas apresentados pela técnica *Fuzzy* quando comparados com a técnica convencional de Análise de Árvore de Falha e Eventos.

Outro estudo de relevância relacionado ao uso da teoria dos conjuntos *Fuzzy* em aplicações de segurança industrial é apresentado em Liang *et al.* (2009). Neste trabalho os autores propõem o uso da técnica HAZOP em softwares computacionais que, aliada às técnicas de fusão de informação baseada na teoria de conjuntos *Fuzzy*, realiza a avaliação de segurança de máquinas industriais sujeitas a cenários com múltiplas fontes de risco. Os diversos desvios encontrados na avaliação HAZOP são submetidos a um processo de fusão de dados que tem o objetivo de definir perigos causados por múltiplos Nós ou múltiplos desvios. O trabalho apresenta ainda, por meio de estudo de caso, uma aplicação do método em uma unidade de

compressor de gás, no qual é identificado as principais causas e consequências de possíveis eventos perigosos e seus níveis de confiabilidade.

As técnicas de avaliação de segurança nem sempre são baseadas nos riscos causados por problemas em hardwares e softwares, mas também em riscos gerados por erros humanos. Diante disso, Peng-cheng *et al.* (2010) propõem o desenvolvimento de uma nova técnica de avaliação de risco causado por erro humano baseada na teoria de conjuntos *Fuzzy*. Tal técnica, denominada FHERAM (do inglês, “*Fuzzy Human Error Risk Assessment*”), utiliza o sistema *Fuzzy* com entradas, regras de implicação e saídas. O modelo proposto baseia-se em três categorias de entrada: probabilidade de erro humano, probabilidade do erro causar algum efeito e consequência do erro. A saída do sistema é o nível de risco do processo avaliado. Para exemplificar a nova metodologia os autores à aplicam na avaliação dos riscos causados por erros humanos em uma planta nuclear. Como conclusão, aponta-se no estudo que o modelo FHERAM apresentou bons resultados na identificação e categorização dos riscos causados por falhas humanas. Ainda, o trabalho aponta os ótimos resultados desta metodologia na modelagem numérica das informações relacionadas com erros humanos que, em muitas situações, se apresentam de forma vaga e imprecisa.

Em artigo publicado no ano de 2016, Ahn & Chang (2016) apresentam uma metodologia HAZOP baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy*. A técnica proposta baseia-se no cálculo do risco através dos conjuntos nebulosos. Inicialmente as componentes frequência e severidade, entradas do modelo, são transformadas em conjuntos *Fuzzy* e, por meio das regras de implicação, realiza-se o cálculo do nível de risco presentes em cada cenário avaliado. Ainda, os autores apresentam, para uma instalação criogênica de gás natural, um comparativo entre a aplicação da técnica HAZOP convencional e a técnica HAZOP modificada. Como resultado do trabalho dos autores, percebe-se que a aplicação da lógica *Fuzzy* gera uma matriz de risco ampliada, com novas categorias de risco. Entretanto, diferentemente dos resultados obtidos no presente trabalho, a transição da matriz de risco obtida pelos autores é ainda discreta e abrupta. Desta forma, pode-se observar uma melhora nos riscos calculados, uma vez que os valores intermediários de patamar de risco geram menores incertezas no processo de avaliação de risco.

3 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento metodológico utilizado para obtenção da planilha HAZOP que, através de dados quantitativos, calcula o risco baseado na lógica *Fuzzy*. Inicialmente, os critérios e parâmetros do risco industrial foram definidos com base em diretrizes nacionais e internacionais. Após isso, realizou-se a transformação das categorias convencionais de frequência, severidade e risco para o universo *Fuzzy*, utilizando para tanto a teoria do valor médio de um intervalo *Fuzzy* proposta por Dubois & Prade (1987). Em seguida, as regras *Fuzzy* e o modelo de inferência foram consolidados. Diante disso, iniciou-se a etapa de desenvolvimento e validação de um aplicativo gerado em linguagem de programação *Visual Basic Application* (VBA) no ambiente de programação do software *Microsoft Excel*®. O próximo passo foi desenvolver uma planilha para o registro dos resultados obtidos na metodologia HAZOP. Por fim, realizou-se um estudo de caso com a aplicação da metodologia desenvolvida no presente trabalho, sendo esta capaz de calcular o nível de risco baseado na teoria dos conjuntos *Fuzzy*.

3.1 Definição de critérios e parâmetros de risco industrial

Antes da execução do estudo de análise e identificação de riscos em uma planta industrial, deve-se definir o critério de risco, de modo que ao final do estudo compare-se os riscos identificados frente a este critério e, posteriormente, defina-se se tais riscos são aceitáveis ou se serão necessárias medidas adicionais para reduzir a frequência do evento perigoso ou realizar a mitigação de sua severidade.

Percebe-se que os critérios de risco adotados nas indústrias em diversos países são reflexo de diversos fatores, dentre eles a legislação do país, fatores culturais, geográficos e sociais. Como exemplo, temos um comparativo, realizado por Ale (2005), entre os critérios de risco industrial adotados no Reino Unido e Holanda. No estudo, foi observado que nestes países os critérios de risco foram consolidados ao longo dos anos com base em aspectos políticos e culturais.

No Reino Unido, por exemplo, a responsabilidade legal pela segurança dos trabalhadores e do público é colocada sobre quem controla a atividade de trabalho, ou seja, pelo empregador, ou também denominado operador do negócio.

Neste sentido, o *Health and Safety Executive* (HSE), órgão responsável pela regulamentação relacionada à saúde, segurança e bem estar no local de trabalho, estabelece que o operador deve fazer o que for razoavelmente praticável para reduzir os riscos dos

trabalhadores. Para tanto, o HSE utiliza padrões, diretrizes e orientações, declarando o que, em sua opinião, é “razoavelmente praticável” para um grande número de atividades industriais. As principais diretrizes são aprovadas e publicadas pelo *Health and Safety Commission (HSC)* e é possível que qualquer uma delas seja utilizada como prova em procedimentos legais contra qualquer empregador que, segundo a HSE, não tenha feito tudo o que for “razoavelmente praticável” para reduzir os riscos presentes em seus negócios (HSE, 2001).

No Brasil, pode-se considerar que as práticas industriais relacionadas ao controle e mitigação do risco industrial tende a acompanhar as exigências das normas regulamentadoras (NRs) criadas pela Ministério do Trabalho Brasileiro (MTb). A norma regulamentadora NR 20 (2017), por exemplo, estabelece requisitos mínimos para a gestão da segurança e saúde no trabalho contra os fatores de risco de acidentes provenientes das atividades de extração, produção, armazenamento, transferência, manuseio e manipulação de inflamáveis e líquidos combustíveis. Ainda a diretriz informa que

As instalações para extração, produção, armazenamento, transferência, manuseio e manipulação de inflamáveis e líquidos combustíveis devem ser projetadas considerando os aspectos de segurança, saúde e meio ambiente que impactem sobre a integridade física dos trabalhadores previstos nas Normas Regulamentadoras, normas técnicas nacionais e, na ausência ou omissão destas, nas normas internacionais, convenções e acordos coletivos, bem como nas demais regulamentações pertinentes em vigor (MTb NR 20, 2017).

Além disso, para determinados tipos de empreendimentos, órgãos governamentais como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), por exemplo, requerem que as avaliações de risco sejam executadas como parte integrante dos processos de licenciamento das unidades industriais (NASCIMENTO, 2012).

Entretanto, percebe-se que a legislação brasileira não estabelece claramente as diretrizes de segurança para que as empresas possam definir os limites de aceitabilidade e tolerabilidade dos riscos em seus processos industriais.

Existem empresas e órgãos reguladores que tornam públicos seus limites e critérios de tolerabilidade e aceitabilidade ao risco industrial. Para auxiliar os processos de avaliação de risco, o órgão internacional CCPS apresenta valores de referência que têm como unidade a probabilidade de fatalidade de um indivíduo por ano (CCPS, 2001). Apresenta-se na Tabela 3.1 estes limites de referência.

Tabela 3.1: Critérios de risco de referência.

Órgãos reguladores e Empresas	Máximo risco tolerável para trabalhadores (todos cenários)	Máximo risco aceitável para trabalhadores (todos cenários)	Máximo risco tolerável para público (todos cenários)	Máximo risco aceitável para o público (todos cenários)
Health & Safety Executive Reino Unido. (Planta Existente)	10^{-3}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-6}
VROM Holanda. (Planta Existente)	-	-	10^{-5}	-
VROM, Holanda. (Planta nova)	-	-	10^{-6}	-
Hong Kong Government. (Planta nova)	-	-	10^{-5}	-
Santa Barbara Country, CA, USA (Planta nova)	-	-	10^{-5}	10^{-7}
Shell (onshore e offshore)	10^{-3}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-6}
BP (onshore e offshore)	10^{-3}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-6}
ICI (onshore)	$3,3 \times 10^{-5}$	-	10^{-4}	-
Rohm and Hass Company	$2,5 \times 10^{-5}$	-	10^{-5}	10^{-7}

Fonte: Adaptado de CCPS (2001).

Para este trabalho, os critérios e limites de risco industrial foram definidos com base em diretrizes nacionais, internacionais e em matrizes típicas de risco do setor de óleo e gás (RAUSAND, 2011). Apresenta-se nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 as categorias de frequência, severidade e risco industrial utilizadas no presente trabalho.

Tabela 3.2: Categorias de Frequência.

Categoria	Frequência (por ano)
V - Frequente	10^{-1} a 1
IV- Provável	10^{-1} a 10^{-2}
III - Pouco Provável	10^{-2} a 10^{-3}
II - Remoto	10^{-3} a 10^{-4}
I - Ext. Remoto	10^{-4} a 10^{-5}

Tabela 3.3: Categorias de Severidade

Categoria	Grau de Severidade
I -Desprezível	0,5 a 1,5
II-Marginal	1,5 a 2,5
III-Média	2,5 a 3,5
IV-Crítica	3,5 a 4,5
V-Catastrófica	4,5 a 5,5

Tabela 3.4: Categorias de Risco

Categoria	Grau de Risco
I – Tolerável	0,5 a 1,5
II - Moderado	1,5 a 2,5
III – Não-Tolerável	2,5 a 3,5

Sendo assim, uma matriz de risco foi criada a partir das categorias de frequência, grau de severidade e risco. Apresenta-se na Tabela 3.5 a matriz de risco com os limites convencionais definidos no presente trabalho.

Tabela 3.5: Matriz de risco convencional

			Categoria de Frequência				
			10^{-4} a 10^{-5}	10^{-3} a 10^{-4}	10^{-2} a 10^{-3}	10^{-1} a 10^{-2}	10^{-1} a 1
			Extremamente remota	Remota	Pouco provável	Provável	Frequente
Categoria de Severidade	4,5 a 5,5	Catastrófica	1,5 a 2,5 Moderado	1,5 a 2,5 Moderado	2,5 a 3,5 Não-Tolerável	2,5 a 3,5 Não-Tolerável	2,5 a 3,5 Não-Tolerável
	3,5 a 4,5	Crítica	0,5 a 1,5 Tolerável	1,5 a 2,5 Moderado	1,5 a 2,5 Moderado	2,5 a 3,5 Não-Tolerável	2,5 a 3,5 Não-Tolerável
	2,5 a 3,5	Média	0,5 a 1,5 Tolerável	0,5 a 1,5 Tolerável	1,5 a 2,5 Moderado	1,5 a 2,5 Moderado	2,5 a 3,5 Não-Tolerável
	1,5 a 2,5	Marginal	0,5 a 1,5 Tolerável	0,5 a 1,5 Tolerável	0,5 a 1,5 Tolerável	1,5 a 2,5 Moderado	1,5 a 2,5 Moderado
	0,5 a 1,5	Despresível	0,5 a 1,5 Tolerável	0,5 a 1,5 Tolerável	0,5 a 1,5 Tolerável	0,5 a 1,5 Tolerável	1,5 a 2,5 Moderado

Fonte: Adaptado de Rausand, 2011.

Considerando as categorias de frequência, severidade e risco como conjuntos convencionais, apresenta-se nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 a representação gráfica dos conjuntos. Neste caso, como a variação dos conjuntos de frequência tem ordem de magnitude de 10, optou-se por representar graficamente os conjuntos em base logarítmica. Além disso, ressalta-se que

a definição quantitativa dos limites (fronteiras) dos conjuntos convencionais é a base da transformação dessas categorias para o universo *Fuzzy*, apresentada no Item 3.2 do presente trabalho.

Figura 3.1: Intervalos dos conjuntos convencionais de frequência.

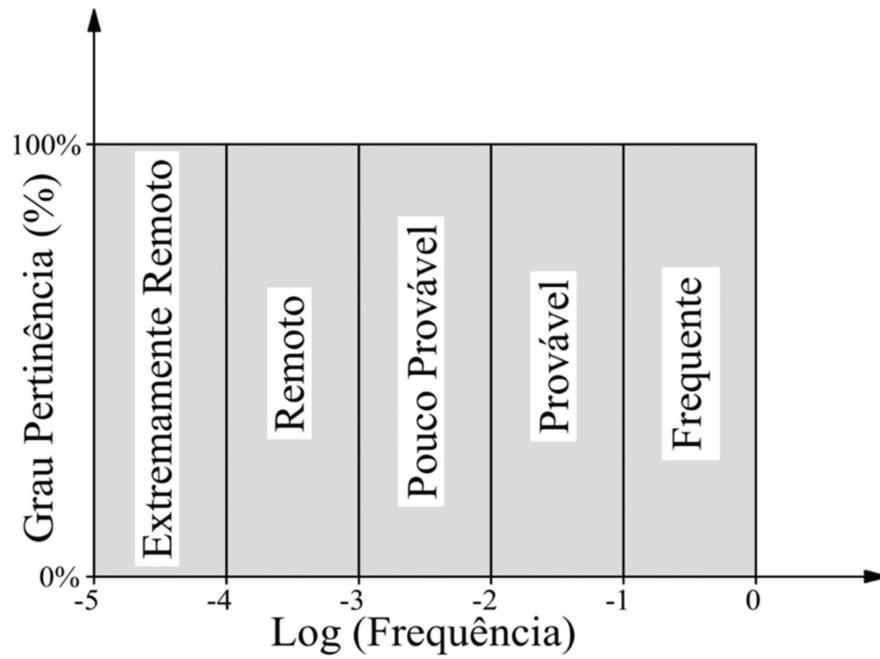


Figura 3.2: Intervalos dos conjuntos convencionais de severidade.

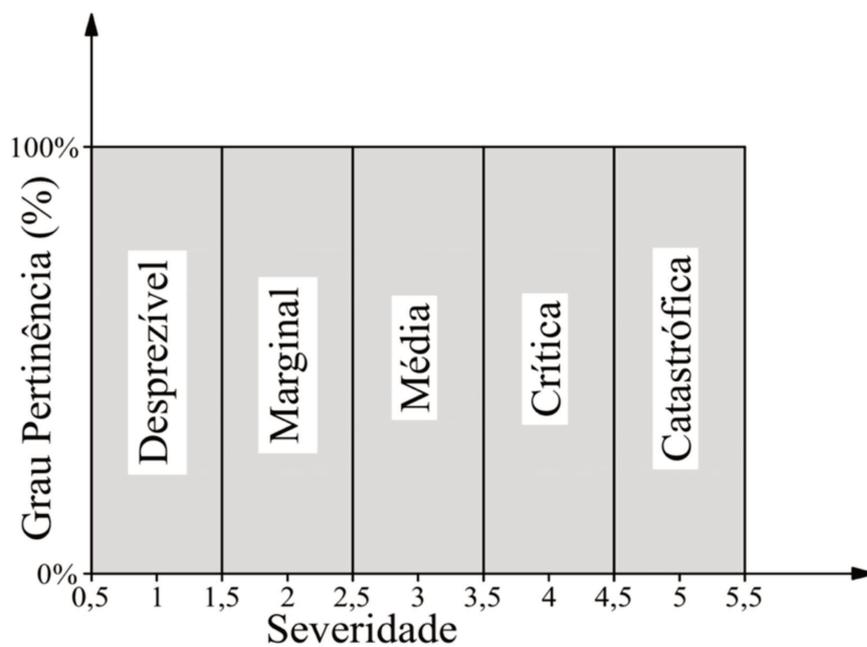
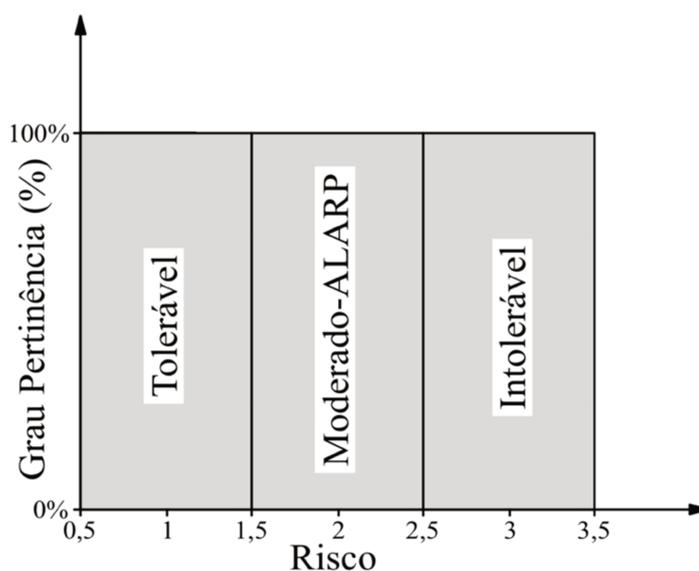


Figura 3.3: Intervalos dos conjuntos convencionais de Risco.



3.2 Transformação para conjuntos *Fuzzy*

A base da aplicação da lógica *Fuzzy* em problemas de engenharia são os conjuntos *Fuzzy*. Tendo em vista que em tais conjuntos não existe uma fronteira bem definida que separe os elementos que pertençam ou não ao conjunto, é possível, por meio de funções de pertinência, obter a conclusão de que um elemento pertence a um conjunto com determinado grau de pertinência que varia entre 0 e 1.

Sabe-se ainda que as categorias de frequência, severidade e risco industrial, utilizadas na análise de risco, são variáveis convencionais com fronteiras e limites bem definidos, ou seja, variáveis de caráter booleano (verdadeiro ou falso) conforme apresentado no Item 3.1 do presente trabalho.

Diante disso, para manipular as variáveis de frequência, severidade e risco industrial no universo *Fuzzy* deve-se realizar a transformação de conjunto convencional para conjunto *Fuzzy*. Tal processo baseia-se na definição das funções de pertinência associadas ao conjunto *Fuzzy*.

De acordo com Ahn & Chang (2016), a definição dos intervalos de uma função de pertinência, em especial quando se manipula variáveis linguísticas, pode ser um processo trabalhoso e difícil. Muitas técnicas, tais como escalonamento, redes neurais, algoritmos genéticos e raciocínio indutivo podem ser utilizadas na obtenção das funções de pertinência

Fuzzy, sendo estas técnicas baseadas na intuição e conhecimento de especialistas (AHN & CHANG, 2016)

Além disso, transformar um conjunto convencional em um conjunto *Fuzzy* pode ser considerado como um problema inverso de determinar o valor médio de um intervalo *Fuzzy*. Dubois & Prade (1987), baseados nas definições de valor esperado da teoria de probabilidade, propuseram que o valor médio esperado de um intervalo *Fuzzy* semicontínuo é o conjunto de valores definidos pela equação 3.1.

$$E(Q) = [E(P) | P \in \mathcal{P}(Q)] \quad (3.1)$$

Em que $E(P)$ é a expectativa usual definida por:

$$E(P) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF(x) \quad (3.2)$$

sendo $F(x)$ a função de distribuição de probabilidade de P .

Ainda, os autores apresentam que o valor médio de um número *Fuzzy* $E(Q)$ é o intervalo compreendido entre os valores esperados, calculados a partir das funções de probabilidade das fronteiras superior e inferior deste intervalo. Logo:

$$E(Q) = [E_*(Q), E^*(Q)] \quad (3.3)$$

Onde

$$E_*(Q) = \inf E(Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF^*(x) \quad (3.4)$$

$$E^*(Q) = \sup E(Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF_*(x) \quad (3.5)$$

No qual as funções $F^*(u)$ e $F_*(u)$ são, respectivamente, a função superior e inferior de distribuição de P . Ainda, P pertence ao conjunto de probabilidades medidas $\mathcal{P}(Q)$ que é definido para suportar Q .

Considerando as condições propostas por Dubois & Prade (1987) de que $\lim_{x \rightarrow -\infty} x^k F(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x^k (1 - F(x)) = 0$ para $k \geq 1$, temos que:

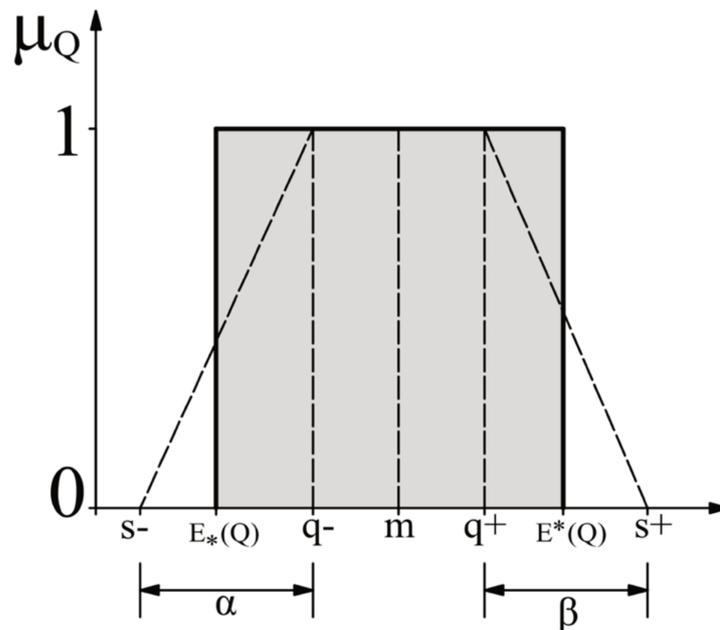
$$E_*(Q) = \int_0^{+\infty} (1 - F^*(x)) dx - \int_{-\infty}^0 F_*(x) dx = q_- - \int_{-\infty}^{q_-} \mu_Q(x) dx \quad (3.6)$$

$$E^*(Q) = \int_0^{+\infty} (1 - F_*(x))dx - \int_{-\infty}^0 F_*(x)dx = q_+ + \int_+^{+\infty} \mu_Q(x)dx \quad (3.7)$$

Este trabalho utiliza funções de pertinência do tipo trapezoidal, definidas matematicamente pela Equação 3.8 e apresentadas graficamente na Figura 3.4.

$$\mu_Q(x) = \begin{cases} 0, & x < s_- \\ \frac{x - s_-}{q_- - s_-}, & s_- \leq x \leq q_- \\ 1, & q_- \leq x \leq q_+ \\ \frac{s_+ - x}{s_+ - q_+}, & q_+ \leq x \leq s_+ \\ 0, & s_+ < x \end{cases} \quad (3.8)$$

Figura 3.4: Núcleo, Fronteira e suporte das funções *Fuzzy*



Fonte: Adaptado de Ross (2010).

Diante disso, é possível calcular os valores esperados $E_*(Q)$ e $E^*(Q)$ para as funções de pertinência trapezoidais. Para o valor esperado inferior, temos:

$$E_*(Q) = q_- - \int_{-\infty}^{q_-} \mu_Q(x)dx = q_- - \int_{-\infty}^{q_-} \frac{x - s_-}{q_- - s_-} dx \quad (3.9)$$

Se $(q_- - s_-)$ é definido graficamente como α , conforme Figura 3.4, temos:

$$\frac{x - s_-}{q_- - s_-} = 1 - \frac{q_- - x}{q_- - s_-} = 1 - \frac{q_- - x}{\alpha} \quad (3.10)$$

Então,

$$E_*(Q) = q_- - \int_{-\infty}^{q_-} \left(1 - \frac{q_- - x}{\alpha}\right) dx \quad (3.11)$$

$$E_*(Q) = q_- - \int_{s_-}^{q_-} \left(1 - \frac{q_- - x}{\alpha}\right) dx \quad (3.12)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left[\left(1 - \frac{q_-}{\alpha}\right)x + \frac{x^2}{2\alpha} \right]_{s_-}^{q_-} = q_- - \frac{\alpha}{2} \quad (3.13)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left\{ \left[\left(q_- - \frac{q_-^2}{\alpha} \right) + \frac{q_-^2}{2\alpha} \right] - \left[\left(s_- - \frac{q_- s_-}{\alpha} \right) + \frac{s_-^2}{2\alpha} \right] \right\} \quad (3.14)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left\{ \left[q_- - \frac{q_-^2}{\alpha} + \frac{0,5q_-^2}{\alpha} \right] - \left[s_- - \frac{q_- s_-}{\alpha} + \frac{0,5s_-^2}{\alpha} \right] \right\} \quad (3.15)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left\{ \left[\frac{q_- \alpha - 0,5q_-^2}{\alpha} \right] - \left[\frac{s_- \alpha - q_- s_- + 0,5s_-^2}{\alpha} \right] \right\} \quad (3.16)$$

Mas $\alpha = q_- - s_-$, logo:

$$E_*(Q) = q_- - \left[\frac{q_-(q_- - s_-) - 0,5q_-^2 - s_-(q_- - s_-) + q_- s_- - 0,5s_-^2}{q_- - s_-} \right] \quad (3.17)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left[\frac{q_-(q_- - s_-) - s_-(q_- - s_-) - (0,5q_-^2 - q_- s_- + 0,5s_-^2)}{q_- - s_-} \right] \quad (3.18)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left[\frac{2(q_- - s_-)(q_- - s_-) - 2(0,5q_-^2 - q_- s_- + 0,5s_-^2)}{2(q_- - s_-)} \right] \quad (3.19)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left[\frac{2(q_- - s_-)(q_- - s_-) - (q_- - s_-)^2}{2(q_- - s_-)} \right] \quad (3.20)$$

$$E_*(Q) = q_- - \left[\frac{2(q_- - s_-) - (q_- - s_-)}{2} \right] \quad (3.21)$$

$$E_*(Q) = q_- - \frac{(q_- - s_-)}{2} = q_- - \frac{\alpha}{2} \quad (3.22)$$

Os cálculos podem ser realizados de forma análoga para o valor esperado superior $E^*(Q)$, obtendo o seguinte resultado:

$$E^*(Q) = q_+ + \int_{q_+}^{+\infty} \mu_Q(x) dx = q_+ + \frac{\beta}{2} \quad (3.23)$$

O valor de m , valor médio entre o valor esperado superior $E^*(Q)$ e inferior $E_*(Q)$, pode ser calculado de duas formas: média aritmética ou média geométrica. Para média aritmética, temos:

$$m_{ari} = \frac{E^*(Q) + E_*(Q)}{2} \quad (3.24)$$

Já para média geométrica, temos:

$$m_{geo} = \sqrt{E^*(Q) \times E_*(Q)} \quad (3.25)$$

Conforme apresentado na Figura 3.4, os valores de q_- e q_+ são respectivamente o valor inferior e superior da base superior da função trapezoidal. Tais valores devem ser calculados pela média aritmética ou média geométrica. Logo, para média aritmética temos:

$$q_- = \frac{m_{ari} + E_*(Q)}{2} = \frac{E^*(Q) + E_*(Q)}{4} + \frac{E_*(Q)}{2} = \frac{0,5 E^*(Q) + 1,5 E_*(Q)}{2} \quad (3.26)$$

$$q_+ = \frac{m_{ari} + E^*(Q)}{2} = \frac{E^*(Q) + E_*(Q)}{4} + \frac{E^*(Q)}{2} = \frac{1,5 E^*(Q) + 0,5 E_*(Q)}{2} \quad (3.27)$$

Já para média geométrica, temos:

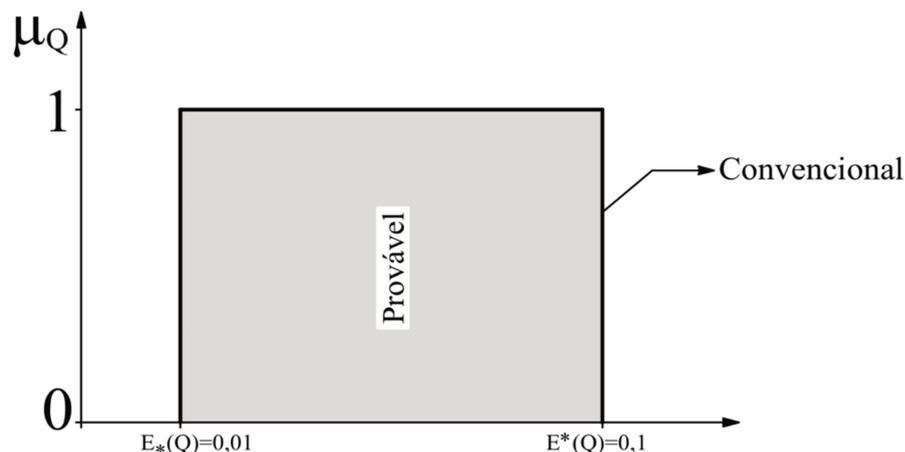
$$q_- = \sqrt{m_{geo} \times E_*(Q)} = \sqrt{\sqrt{E^*(Q) \times E_*(Q)} \times E_*(Q)} = \sqrt[4]{E^*(Q)} \times \sqrt[4]{E_*(Q)^3} \quad (3.28)$$

$$q_+ = \sqrt{m_{geo} \times E^*(Q)} = \sqrt{\sqrt{E^*(Q) \times E_*(Q)} \times E^*(Q)} = \sqrt[4]{E_*(Q)} \times \sqrt[4]{E^*(Q)^3} \quad (3.29)$$

A média aritmética deve ser utilizada quando as funções de pertinência representam variáveis de natureza linear. Para variáveis não lineares, tais como as variações logarítmicas da frequência de ocorrência do presente trabalho, deve-se utilizar a média geométrica.

Utilizando a teoria proposta por *Dubois & Prade* (1987), a transformação de uma variável convencional em uma variável Fuzzy é realizada considerando-se que os valores esperados $E_*(Q)$ e $E^*(Q)$ são os limites superior e inferior do intervalo convencional. A título de exemplo, será realizada a transformação da categoria frequência provável. Conforme apresentado na Tabela 3.2, para se enquadrar na categoria de frequência provável, um evento deve ter taxa de ocorrência entre uma vez a cada 100 anos (Limite inferior de 0,01 ocorrências por ano) e uma vez a cada 10 anos (Limite superior de 0,1 ocorrências por ano). Apresenta-se na Figura 3.5 a categoria de frequência provável.

Figura 3.5: Gráfico da categoria de frequência provável convencional.



Assumindo o valor esperado inferior de $E_*(Q) = 0,01$ e o valor esperado superior de $E^*(Q) = 0,1$ (limites do conjunto convencional), os parâmetros m, q_-, q_+, s_-, s_+ , que representam a função de pertinência trapezoidal do conjunto Fuzzy, podem ser calculados pelas equações apresentadas.

Para as categorias de frequência, que possui natureza logarítmica, o valor de m é calculado pela média geométrica. Assim temos:

$$m_{geo} = \sqrt{E^*(Q) \times E_*(Q)} = \sqrt{0,01 \times 0,1} = 0,03162 \quad (3.30)$$

Logo, pelas equações 3.28 e 3.29, temos:

$$q_- = \sqrt{m_{geo} \times E_*(Q)} = \sqrt{0,03162 \times 0,01} = 0,0178 \quad (3.31)$$

$$q_+ = \sqrt{m_{geo} \times E^*(Q)} = \sqrt{0,03162 \times 0,1} = 0,0562 \quad (3.32)$$

Diante disso, pelas equações 3.22 e 3.23, os valores de α e β são:

$$\alpha = 2 \times (q_- - E_*(Q)) = 2 \times (0,0178 - 0,01) = 0,01556 \quad (3.33)$$

$$\beta = 2 \times (E^*(Q) - q_+) = 2 \times (0,1 - 0,0562) = 0,08753 \quad (3.34)$$

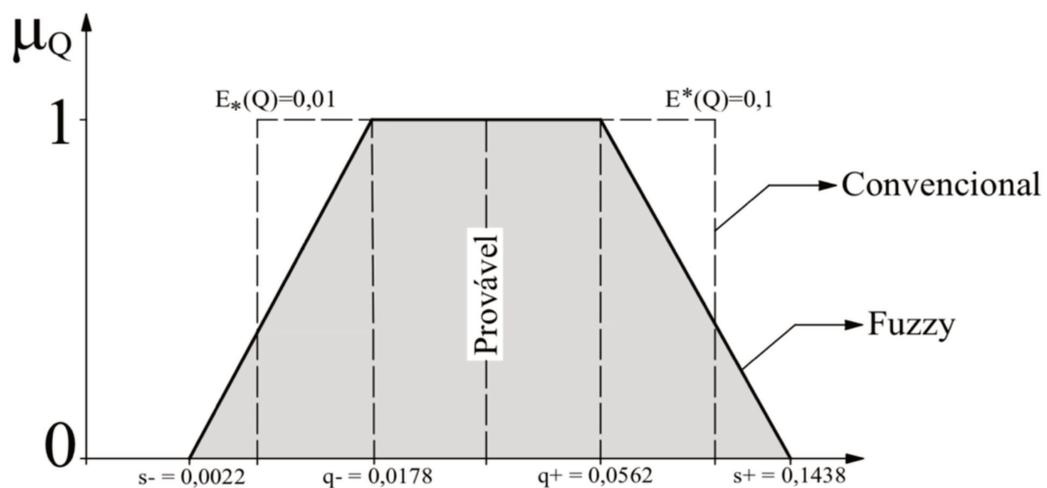
Por fim, os valores de s_- e s_+ é obtido por:

$$s_- = q_- - \alpha = 0,0178 - 0,01556 = 0,00221 \quad (3.35)$$

$$s_+ = q_+ + \beta = 0,0562 + 0,08753 = 0,14376 \quad (3.36)$$

Apresenta-se na Figura 3.6 a função de pertinência *Fuzzy* para a categoria frequência provável.

Figura 3.6: Função de pertinência da categoria de frequência provável *Fuzzy*.



De maneira análoga, o mesmo cálculo pode ser realizado para as demais categorias de frequência, severidade e risco industrial. Ressalta-se que, diferentemente das categorias de frequência, que utiliza média geométrica, para severidade e risco industrial utiliza-se média aritmética nos cálculos. Apresenta-se abaixo, Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8, os resultados obtidos para todas as categorias do presente trabalho.

Tabela 3.6: Transformação dos conjuntos de Frequência para *Fuzzy*.

Categoria	$E_*(Q)$	$E^*(Q)$	m_{geo}	q_-	q_+	α	β	s_-	s_+
Frequente	0,1	1	3,2E-01	1,8E-01	5,6E-01	1,6E-01	8,8E-01	2,2E-02	1,4E+00
Provável	0,01	0,1	3,2E-02	1,8E-02	5,6E-02	1,6E-02	8,8E-02	2,2E-03	1,4E-01
Pouco Provável	0,001	0,01	3,2E-03	1,8E-03	5,6E-03	1,6E-03	8,8E-03	2,2E-04	1,4E-02
Remota	0,0001	0,001	3,2E-04	1,8E-04	5,6E-04	1,6E-04	8,8E-04	2,2E-05	1,4E-03
Ext. Remota	0,00001	0,0001	3,2E-05	1,8E-05	5,6E-05	1,6E-05	8,8E-05	2,2E-06	1,4E-04

Tabela 3.7: Transformação dos conjuntos de Severidade para *Fuzzy*.

Categoria	$E_*(Q)$	$E^*(Q)$	m_{arit}	q_-	q_+	α	β	s_-	s_+
Desprezível	0,5	1,5	1	0,75	1,25	0,5	0,5	0,25	1,75
Marginal	1,5	2,5	2	1,75	2,25	0,5	0,5	1,25	2,75
Média	2,5	3,5	3	2,75	3,25	0,5	0,5	2,25	3,75
Crítica	3,5	4,5	4	3,75	4,25	0,5	0,5	3,25	4,75
Catastrófica	4,5	5,5	5	4,75	5,25	0,5	0,5	4,25	5,75

Tabela 3.8: Transformação dos conjuntos de Risco para *Fuzzy*.

Categoria	$E_*(Q)$	$E^*(Q)$	m_{arit}	q_-	q_+	α	β	s_-	s_+
Tolerável	0,5	1,5	1	0,75	1,25	0,5	0,5	0,25	1,75
Moderado-ALARP	1,5	2,5	2	1,75	2,25	0,5	0,5	1,25	2,75
Intolerável	2,5	3,5	3	2,75	3,25	0,5	0,5	2,25	3,75

No caso da frequência, deve-se realizar uma transformação das funções de pertinência *Fuzzy* para a base logarítmica. A Tabela 3.9 apresenta, em base logarítmica, os valores que definem as funções de pertinência trapezoidal para as categorias de frequência.

Tabela 3.9: Funções de pertinência *Fuzzy* em base logarítmica.

Categoria	$\text{Log10}(q_-)$	$\text{Log10}(q_+)$	$\text{Log10}(s_-)$	$\text{Log10}(s_+)$
Frequente	-0,75	-0,25	-1,654	0,158
Provável	-1,75	-1,25	-2,654	-0,842
Pouco Provável	-2,75	-2,25	-3,654	-1,842
Remota	-3,75	-3,25	-4,654	-2,842
Ext. Remota	-4,75	-4,25	-5,654	-3,842

Apresenta-se na Figura 3.7, Figura 3.8 e Figura 3.8 a representação gráfica das funções de pertinência das categorias de frequência, severidade e risco industrial.

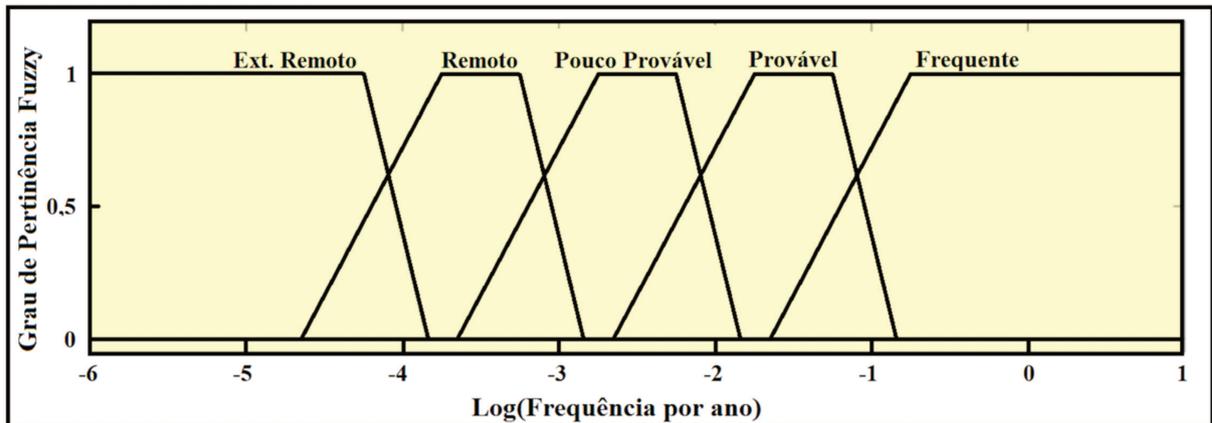
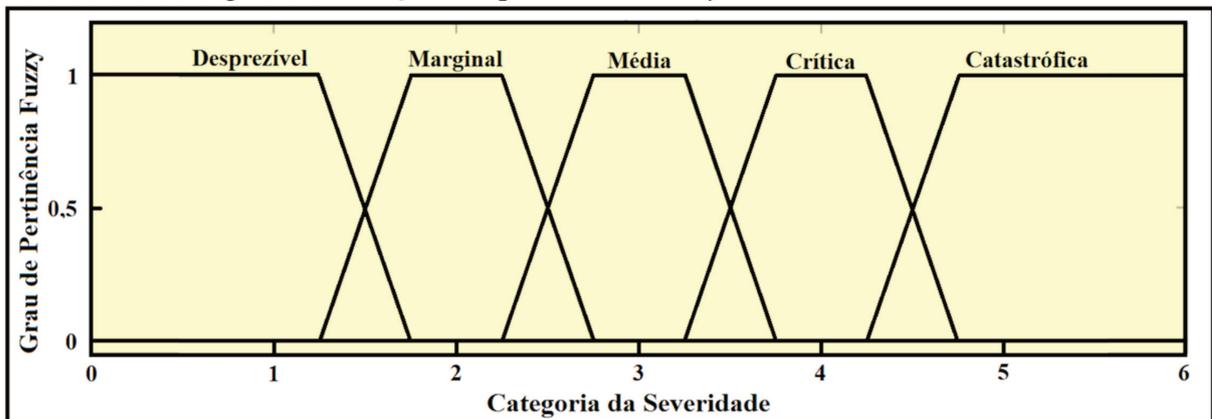
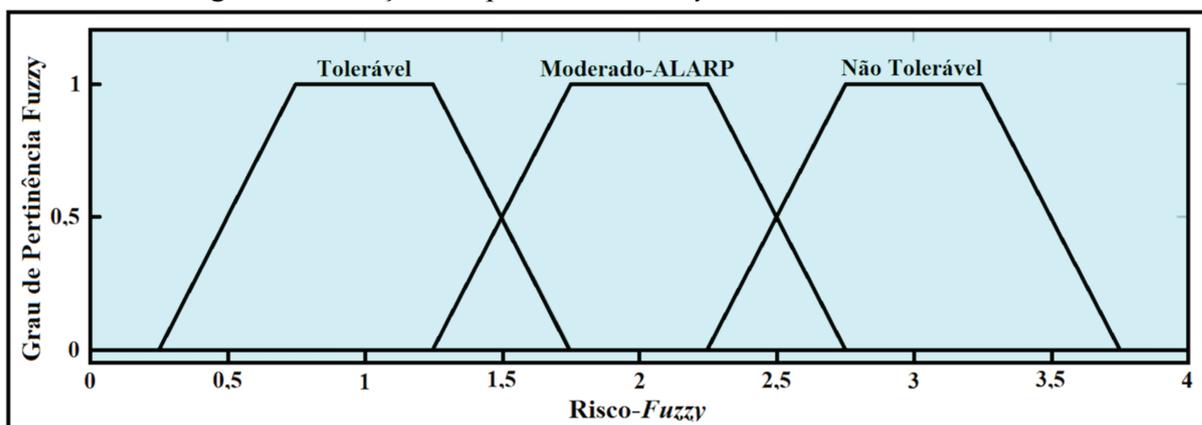
Figura 3.7: Funções de pertinência *Fuzzy* da entrada frequência.Figura 3.8: Funções de pertinência *Fuzzy* da entrada severidade.

Figura 3.9: Funções de pertinência *Fuzzy* da saída risco industrial.

3.3 Elaboração de regras *Fuzzy* e modelo de inferência.

A aplicação da lógica *Fuzzy* para resoluções de problemas de engenharia é baseada na utilização das regras de inferência do tipo Se-Então (“if-then”), utilizadas para operar os conjuntos *Fuzzy* com o objetivo de obter uma conclusão. Tais regras traduzem o conhecimento humano e devem ser criadas a partir da experiência de um especialista a respeito do sistema em que se aplica a lógica nebulosa.

Neste trabalho, para a modelagem do risco industrial, foram propostas 25 regras de implicação do tipo Se-Então que, formuladas com base na matriz de risco convencional apresentada na Tabela 3.5, têm como entrada (antecedentes) as categorias de frequência e severidade e, como saída (consequente), o nível de risco, sendo este categorizado em Tolerável, Moderado e Não-Tolerável. A seguir, apresenta-se na Tabela 3.10 as 25 regras utilizadas no presente trabalho.

Após a definição das regras *Fuzzy* inicia-se a etapa de inferência. Nesta etapa, as 25 regras elaboradas são aplicadas nas entradas, ou seja, nos conjuntos nebulosos de frequência e severidade do modelo *Fuzzy*. Como resultado, obtemos, por meio de cada regra, um grau de pertinência no conjunto nebuloso de saída sendo, este o conjunto, o risco industrial. Assume-se que o operador E (AND), que realiza a operação entre os antecedentes das regras, considera o valor mínimo entre o grau de pertinência dos antecedentes, garantindo assim que os resultados estejam limitados ao intervalo (0,1).

Tabela 3.10: Regras *Fuzzy* utilizadas para cálculo do Risco

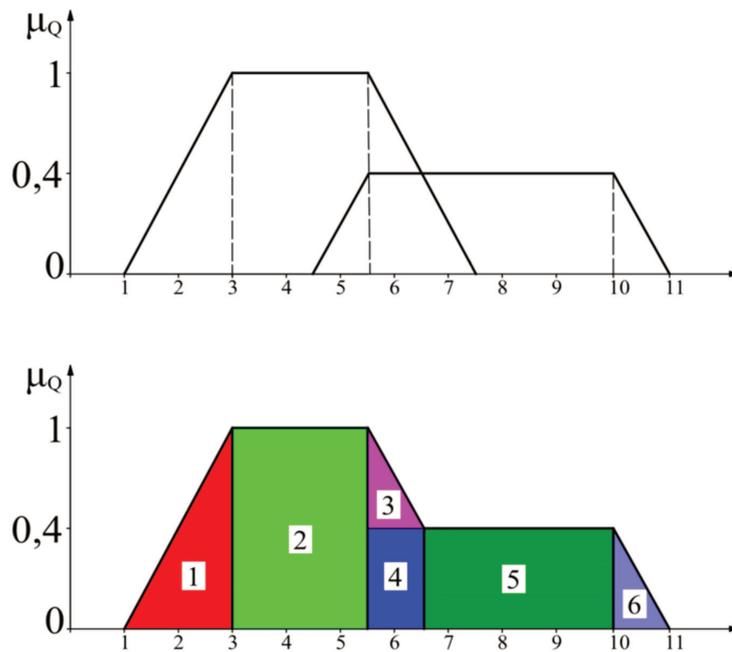
Nº	Regras <i>Fuzzy</i> do tipo Se-Então
#1	<i>Se (Freq.) é Frequente E (Sev.) é Desprezível Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#2	<i>Se (Freq.) é Frequente E (Sev.) é Marginal Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#3	<i>Se (Freq.) é Frequente E (Sev.) é Média Então (Risco-Fuzzy) é Não-Tolerável.</i>
#4	<i>Se (Freq.) é Frequente E (Sev.) é Crítica Então (Risco-Fuzzy) é Não-Tolerável.</i>
#5	<i>Se (Freq.) é Frequente E (Sev.) é Catastrófica Então (Risco-Fuzzy) é Não-Tolerável.</i>
#6	<i>Se (Freq.) é Provável E (Sev.) é Desprezível Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#7	<i>Se (Freq.) é Provável E (Sev.) é Marginal Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#8	<i>Se (Freq.) é Provável E (Sev.) é Média Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#9	<i>Se (Freq.) é Provável E (Sev.) é Crítica Então (Risco-Fuzzy) é Não-Tolerável.</i>
#10	<i>Se (Freq.) é Provável E (Sev.) é Catastrófica Então (Risco-Fuzzy) é Não-Tolerável.</i>
#11	<i>Se (Freq.) é Pouco-Provável E (Sev.) é Desprezível Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#12	<i>Se (Freq.) é Pouco-Provável E (Sev.) é Marginal Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#13	<i>Se (Freq.) é Pouco-Provável E (Sev.) é Média Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#14	<i>Se (Freq.) é Pouco-Provável E (Sev.) é Crítica Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#15	<i>Se (Freq.) é Pouco-Provável E (Sev.) é Catastrófica Então (Risco-Fuzzy) é Não-Tolerável.</i>
#16	<i>Se (Freq.) é Remota E (Sev.) é Desprezível Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#17	<i>Se (Freq.) é Remota E (Sev.) é Marginal Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#18	<i>Se (Freq.) é Remota E (Sev.) é Média Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#19	<i>Se (Freq.) é Remota E (Sev.) é Crítica Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#20	<i>Se (Freq.) é Remota E (Sev.) é Catastrófica Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>
#21	<i>Se (Freq.) é Ext. Remota E (Sev.) é Desprezível Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#22	<i>Se (Freq.) é Ext. Remota E (Sev.) é Marginal Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#23	<i>Se (Freq.) é Ext. Remota E (Sev.) é Média Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#24	<i>Se (Freq.) é Ext. Remota E (Sev.) é Crítica Então (Risco-Fuzzy) é Tolerável.</i>
#25	<i>Se (Freq.) é Ext. Remota E (Sev.) é Catastrófica Então (Risco-Fuzzy) é Moderado.</i>

Posteriormente, agregam-se as saídas de todas as regras utilizadas no processo de inferência. A agregação das saídas das regras é realizada pelo processo de Defuzzificação, que tem como objetivo transformar o valor da variável linguística de saída em uma saída numérica que melhor represente os valores *Fuzzy*. Neste trabalho, utilizou-se o método do Centro-da-Área que calcula o centroide da área obtida pela agregação das saídas *Fuzzy* de todas as regras. Ainda, em vista da facilidade de se dividir a área total em subáreas, conforme ilustrado na Figura 3.10, o centro das áreas X^* pode ser calculado com a Equação 3.37.

$$X^* = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \times \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (3.37)$$

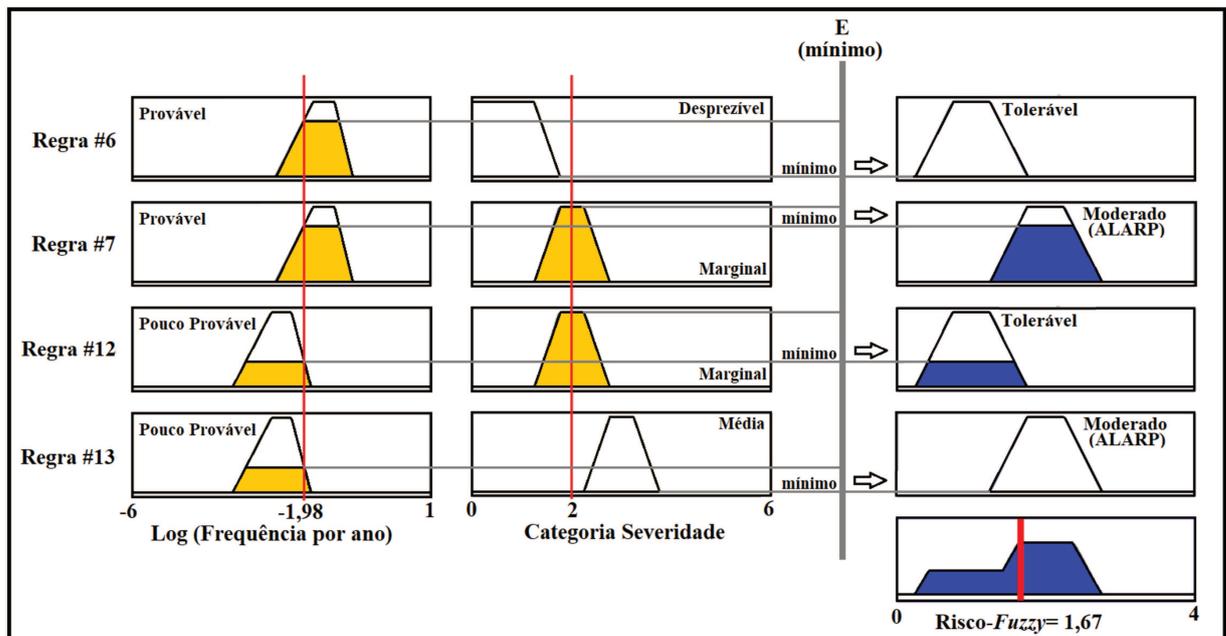
No qual N indica o número de subáreas e A_i e \bar{X}_i representam, respectivamente, a área e o centro de área de cada subárea i^{th} .

Figura 3.10: Divisão de áreas para cálculo do centroide.



Apresenta-se na Figura 3.11 um exemplo de cálculo do Risco-*Fuzzy* para um cenário que possui taxa de ocorrência de uma vez a cada 95 anos e severidade de categoria 2 (Marginal).

Figura 3.11: Cálculo do Risco-*Fuzzy*.



A título ilustrativo foi apresentado na Figura 3.11 apenas 4 das 25 regras presentes no modelo de inferência, sendo elas as regras N°6, N°7, N°12 e N°13. Percebe-se, no entanto, que devido ao operador **E** considerar o menor valor entre os antecedentes (frequência e severidade) apenas as regras N°7 e N°12 produzem valores nos conjuntos de saída diferentes de zero. Logo, o valor de risco é calculado com base na agregação dos valores de saída das regras N°7 e N°12 que, neste exemplo, tem o valor de 1,67.

3.4 Desenvolvimento e validação do programa em VBA

As reuniões de HAZOP comumente são realizadas com a utilização de uma planilha desenvolvida em ambiente Excel®, que auxiliam na execução da avaliação e identificação dos riscos e problemas operacionais do processo avaliado. Esta planilha apresenta os desvios de processo em suas linhas, e os resultados de avaliação de todas as etapas do estudo são adicionados nas colunas (RAUSAND, 2011; ERICSON, 2015). A seguir, apresenta-se na Figura 3.12 uma planilha convencional de HAZOP, em que as categorias de frequência, severidade e risco traduzem a matriz de risco convencional, apresentada na Tabela 3.5.

Figura 3.12: Planilha convencional de HAZOP.

Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Anos)	Severidade	Risco FUZZY	Recomendações
Pressão alta	Falha da válvula de controle (Falha Aberta)	Válvula de Segurança (PSV)	Ruptura de tubulação, grande vazamento com Explosão.	III	V	III	Instalação de válvula de segurança redundante de modo a diminuir a probabilidade de ocorrência do evento.
Pressão baixa	Parada/Falha de Bomba	Indicador de Pressão (PIT)	Parada operacional ocasionando perdas financeiras.	II	II	II	Instalação de bomba reserva de modo a manter a unidade em operação.

Diante disso, o próximo passo do trabalho foi elaborar uma planilha no ambiente Excel®, capaz de calcular o risco industrial utilizando a lógica *Fuzzy*, considerando assim as categorias dos conjuntos *Fuzzy*, as regras elaboradas e o modelo inferência da lógica nebulosa. Para o desenvolvimento desta planilha de cálculo do risco-*Fuzzy*, utilizou-se a linguagem de programação *Visual Basic Application* (VBA) desenvolvida no ambiente de programação do software *Microsoft Excel*®. O programa desenvolvido considera duas entradas para o cálculo do risco industrial com uso da lógica *Fuzzy*, sendo elas a frequência de ocorrência e grau de severidade do evento perigoso. A frequência de ocorrência terá sua unidade em anos, ou seja, deve-se adicionar os anos de ocorrência de um evento. Já a entrada de severidade deve ser adicionada em valores discretos que vão de 1 a 5, representando assim as cinco categorias de severidade da matriz de risco.

O primeiro passo no desenvolvimento do programa em *Visual Basic Application* (VBA) é criar as funções de pertinências *Fuzzy* das categorias de frequência, severidade e risco industrial, conforme apresentadas no item 3.2 do presente trabalho. Apresenta-se na Figura 3.13 o código-fonte do programa que realiza a criação das funções de pertinência para frequência. As funções de pertinência relacionadas com as categorias de severidade são criadas de maneira análoga.

Figura 3.13: Código-Fonte de criação das funções de frequência.

```

1  'Declara funções de pertinência para frequência
2  Dim freq_freq As Double 'Cria variável frequência frequente
3  Dim freq_prov As Double 'Cria variável frequência provável
4  Dim freq_pprov As Double 'Cria variável frequência pouco provável
5  Dim freq_rem As Double 'Cria variável frequência remota
6  Dim freq_ere As Double 'Cria variável frequência ext. remota
7  'Declara parâmetro das funções de pertinência trapezoidal para frequência
8  Dim freq_freq_par(3) As Double 'Cria vetor com 4 posições para frequente
9  freq_freq_par(0) = -1.654 'Valor de s. para frequente alocado na posição 0
10 freq_freq_par(1) = -0.75 'Valor de q. para frequente alocado na posição 1
11 freq_freq_par(2) = -0.25 'Valor de q+ para frequente alocado na posição 2
12 freq_freq_par(3) = 0.157 'Valor de s+ para frequente alocado na posição 3
13
14 Dim freq_prov_par(3) As Double 'Cria vetor com 4 posições para provável
15 freq_prov_par(0) = -2.654 'Valor de s. para provável alocado na posição 0
16 freq_prov_par(1) = -1.75 'Valor de q. para provável alocado na posição 1
17 freq_prov_par(2) = -1.25 'Valor de q+ para provável alocado na posição 2
18 freq_prov_par(3) = -0.842 'Valor de s+ para provável alocado na posição 3
19
20 Dim freq_pprov_par(3) As Double 'Cria vetor com 4 posições para pouco provável
21 freq_pprov_par(0) = -3.654 'Valor de s. para pouco provável alocado na posição 0
22 freq_pprov_par(1) = -2.75 'Valor de q. para pouco provável alocado na posição 1
23 freq_pprov_par(2) = -2.25 'Valor de q+ para pouco provável alocado na posição 2
24 freq_pprov_par(3) = -1.842 'Valor de s+ para pouco provável alocado na posição 3
25
26 Dim freq_rem_par(3) As Double 'Cria vetor com 4 posições para remota
27 freq_rem_par(0) = -4.654 'Valor de s. para remota alocado na posição 0
28 freq_rem_par(1) = -3.75 'Valor de q. para remota alocado na posição 1
29 freq_rem_par(2) = -3.25 'Valor de q+ para remota alocado na posição 2
30 freq_rem_par(3) = -2.842 'Valor de s+ para remota alocado na posição 3
31
32 Dim freq_ere_par(3) As Double 'Cria vetor com 4 posições para ext. remota
33 freq_ere_par(0) = -5.654 'Valor de s. para ext. remota alocado na posição 0
34 freq_ere_par(1) = -4.75 'Valor de q. para ext. remota alocado na posição 1
35 freq_ere_par(2) = -4.25 'Valor de q+ para ext. remota alocado na posição 2
36 freq_ere_par(3) = -3.842 'Valor de s+ para ext. remota alocado na posição 3

```

Após a criação das funções de pertinência deve-se, para cada valor de entrada de frequência e severidade, calcular o grau de pertinência no universo *Fuzzy*. A título de ilustração, apresenta-se na Figura 3.14 o código-fonte utilizado no cálculo do grau de pertinência para as categorias de frequência: frequente, provável e pouco-provável.

Figura 3.14: Código-Fonte de cálculo do grau de pertinência da entrada.

```

1  'Condiciona para calcular o grau de pertinência de 0 a 1 da entrada em frequente
2  If freq_log <= freq_freq_par(0) Then
3      freq_freq = 0
4  ElseIf freq_log > freq_freq_par(0) And freq_log <= freq_freq_par(1) Then
5      freq_freq = (freq_log - freq_freq_par(0)) / (freq_freq_par(1) - freq_freq_par(0))
6  Else
7      freq_freq = 1
8  End If
9
10 'Condiciona para calcular o grau de pertinência de 0 a 1 da entrada em provável
11 If freq_log <= freq_prov_par(0) Then
12     freq_prov = 0
13 ElseIf freq_log > freq_prov_par(0) And freq_log <= freq_prov_par(1) Then
14     freq_prov = (freq_log - freq_prov_par(0)) / (freq_prov_par(1) - freq_prov_par(0))
15 ElseIf freq_log > freq_prov_par(1) And freq_log <= freq_prov_par(2) Then
16     freq_prov = 1
17 ElseIf freq_log > freq_prov_par(2) And freq_log <= freq_prov_par(3) Then
18     freq_prov = (freq_prov_par(3) - freq_log) / (freq_prov_par(3) - freq_prov_par(2))
19 Else
20     freq_prov = 0
21 End If
22
23 'Condiciona para calcular o grau de pertinência de 0 a 1 da entrada em pouco provável
24 If freq_log <= freq_pprov_par(0) Then
25     freq_pprov = 0
26 ElseIf freq_log > freq_pprov_par(0) And freq_log <= freq_pprov_par(1) Then
27     freq_pprov = (freq_log - freq_pprov_par(0)) / (freq_pprov_par(1) - freq_pprov_par(0))
28 ElseIf freq_log > freq_pprov_par(1) And freq_log <= freq_pprov_par(2) Then
29     freq_pprov = 1
30 ElseIf freq_log > freq_pprov_par(2) And freq_log <= freq_pprov_par(3) Then
31     freq_pprov = (freq_pprov_par(3) - freq_log) / (freq_pprov_par(3) - freq_pprov_par(2))
32 Else
33     freq_pprov = 0
34 End If

```

Após o cálculo do grau de pertinência, o próximo passo da programação em *Visual Basic Application (VBA)* é calcular a saída para todas as regras *Fuzzy*. A saída das regras é calculada utilizando o condicional Se-Então da linguagem de programação. Apresenta-se na Figura 3.15 um exemplo do código-fonte utilizado para o cálculo de grau de pertinência na saída de cada regra.

O próximo passo executado pelo programa em VBA é realizar o método de Defuzzyficação do centro de área, obtendo assim a saída final do processo de inferência *Fuzzy* que é o risco industrial. As áreas do método centroide são calculadas com base nas equações das funções de pertinência e nos valores do grau de pertinência no conjunto de saída de cada regra. Apresenta-se na Figura 3.16 e Figura 3.17 uma ilustração das funções de pertinência de cada categoria e o cálculo das áreas, respectivamente.

Figura 3.15: Código-Fonte do cálculo da saída das regras *Fuzzy*.

```

1 'REGRA 1 – Valor de saída baseado no mínimo entre as categorias de frequência e severidade
2 If freq_freq > sev_des Then
3 risco_fuzzy_mi(0) = sev_des
4 Else
5 risco_fuzzy_mi(0) = freq_freq
6 End If
7
8 'REGRA 2 – Valor de saída baseado no mínimo entre as categorias de frequência e severidade
9 If freq_freq > sev_mar Then
10 risco_fuzzy_mi(1) = sev_mar
11 Else
12 risco_fuzzy_mi(1) = freq_freq
13 End If
14
15 'REGRA 3 – Valor de saída baseado no mínimo entre as categorias de frequência e severidade
16 If freq_freq > sev_med Then
17 risco_fuzzy_mi(2) = sev_med
18 Else
19 risco_fuzzy_mi(2) = freq_freq
20 End If

```

Figura 3.16: Código-Fonte do cálculo das funções das categorias de risco.

```

1 'Calculo funções de pertinência para as categorias de risco.
2 f_mi_t = (mi_t * (b_t - a_t)) + a_t 'f de u
3
4 g_mi_t = (mi_t * (c_t - d_t)) + d_t
5 g_mi_m = (mi_m * (c_t - d_t)) + d_t
6
7 h_mi_t = (mi_t * (b_m - a_m)) + a_m
8 h_mi_m = (mi_m * (b_m - a_m)) + a_m
9
10
11 i_mi_m = (mi_m * (c_m - d_m)) + d_m
12 i_mi_nt = (mi_nt * (c_m - d_m)) + d_m
13
14 j_mi_m = (mi_m * (b_nt - a_nt)) + a_nt
15 j_mi_nt = (mi_nt * (b_nt - a_nt)) + a_nt
16
17 k_mi_nt = (mi_nt * (c_nt - d_nt)) + d_nt

```

Após a conclusão do algoritmo, foi realizado um teste de verificação e validação do programa desenvolvido em VBA, comparando este modelo ao Toolkit *Fuzzy* do software MATLAB®, desenvolvido pela The MathWorks Inc. Diante disso, verificou-se que os valores obtidos na planilha em Excel® estavam de acordo com os valores apresentados na ferramenta Toolkit *Fuzzy* do Software MATLAB®. Apresenta-se nas Figuras 3.18 e 3.19 a nova matriz de risco obtida com o cálculo de risco baseado na teoria dos conjuntos *Fuzzy*.

Figura 3.17: Código-Fonte do cálculo das áreas e centro das áreas.

```

1 'Cálculo das áreas e centros de área das subáreas formadas pelo método do centroide
2
3 Dim t_a1 As Double
4 Dim t_a1_c As Double
5 t_a1 = ((f_mi_t - a_t) * mi_t) / 2 'Cálculo da subárea tolerável A1
6 t_a1_c = (f_mi_t + f_mi_t + a_t) / 3 'Cálculo do centro da subárea tolerável A1
7
8 Dim t_a2 As Double
9 Dim t_a2_c As Double
10 t_a2 = ((c_t - f_mi_t) * mi_t) 'Cálculo da subárea tolerável A2
11 t_a2_c = (c_t + f_mi_t) / 2 'Cálculo do centro da subárea tolerável A2
12
13 Dim m_a1 As Double
14 Dim m_a1_c As Double
15 m_a1 = (c_m - b_m) * mi_m 'Cálculo da subárea moderado A1
16 m_a1_c = (c_m + b_m) / 2 'Cálculo do centro da subárea moderado A1
17
18 Dim nt_a1 As Double
19 Dim nt_a1_c As Double
20 nt_a1 = ((d_nt - k_mi_nt) * mi_nt) / 2 'Cálculo da subárea não tolerável A1
21 nt_a1_c = (k_mi_nt + k_mi_nt + d_nt) / 3 'Cálculo do centro da subárea não tolerável A1
22
23 Dim nt_a2 As Double
24 Dim nt_a2_c As Double
25 nt_a2 = (k_mi_nt - b_nt) * mi_nt 'Cálculo da subárea não tolerável A2
26 nt_a2_c = (k_mi_nt + b_nt) / 2 'Cálculo do centro da subárea não tolerável A2

```

Figura 3.18: Matriz de Risco-Fuzzy.

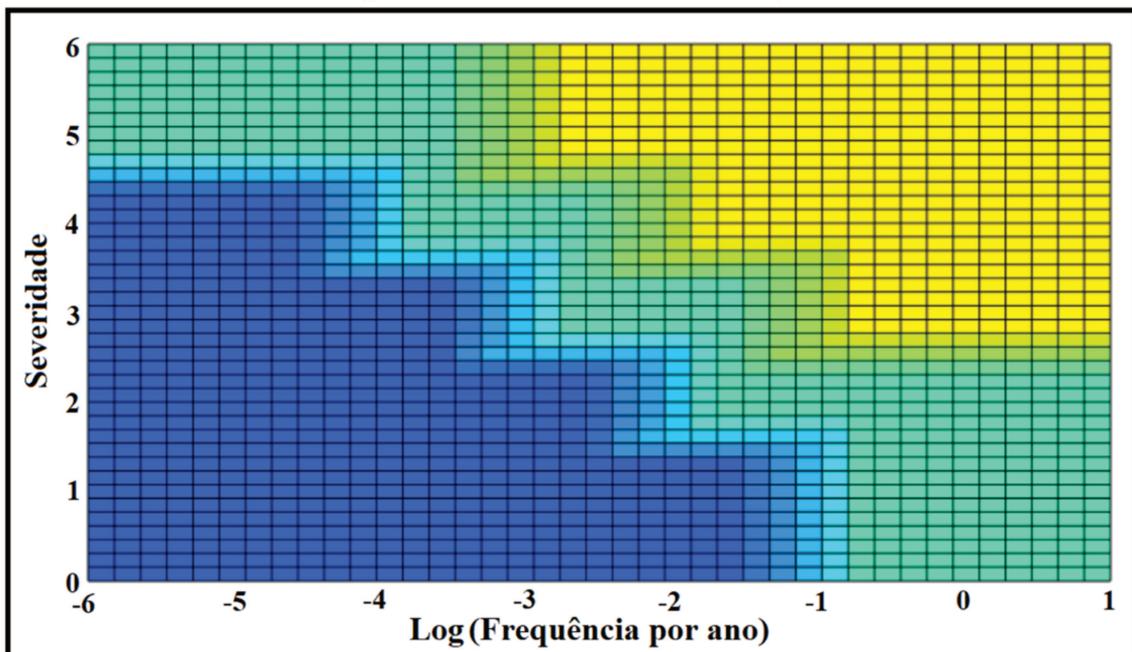
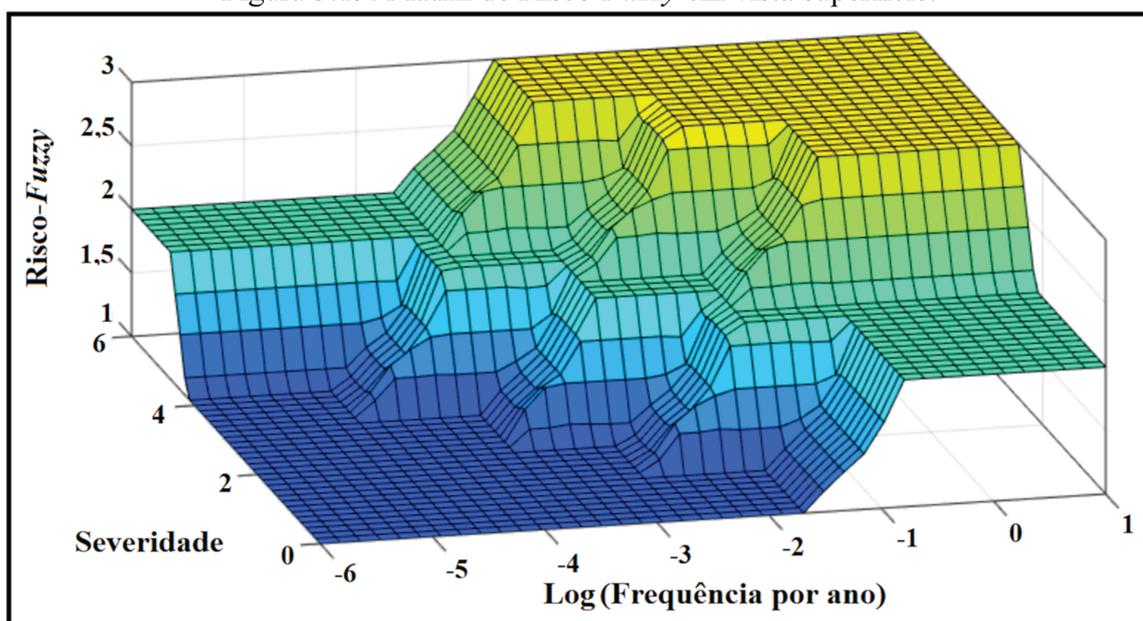


Figura 3.19: Matriz de Risco-*Fuzzy* em vista superfície.

3.5 Elaboração da planilha HAZOP-*Fuzzy*

Conforme mencionado no Item 2.2.5, a aplicação da metodologia HAZOP na identificação e avaliação de risco é realizada com auxílio de uma planilha de registro. Para o presente trabalho, elaborou-se uma planilha que, baseada na planilha HAZOP convencional, incorpora os cálculos do risco com a lógica *Fuzzy*. Apresenta-se na Figura 3.20 a planilha HAZOP elaborada.

Figura 3.20: Planilha de HAZOP-*Fuzzy*

COLUNA 1	COLUNA 2	COLUNA 3	COLUNA 4	COLUNA 5	COLUNA 6	COLUNA 7	COLUNA 8
Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Anos)	Severidade	Risco FUZZY	Recomendações
Pressão alta	Falha da válvula de controle (Falha Aberta)	Válvula de Segurança (PSV)	Ruptura de tubulação, grande vazamento com Explosão.	950	5	2,67	Instalação de válvula de segurança redundante de modo a diminuir a probabilidade de ocorrência do evento.
Pressão baixa	Parada/Falha de Bomba	Indicador de Pressão (PIT)	Parada operacional ocasionando perdas financeiras.	97	2	1,65	Instalação de bomba reserva de modo a manter a unidade em operação.

A primeira e segunda coluna da planilha são utilizadas para registrar, respectivamente, o desvio de processo e sua causa. Um desvio, por exemplo, pode ser a Pressão Alta em uma tubulação de processo, ocasionado pela falha de uma válvula de controle. Conforme apresentado anteriormente no Item 2.2.5, os desvios são obtidos pela junção de palavras-guia e parâmetros. A terceira coluna é utilizada para registrar as camadas de proteção, ou salvaguardas, que ajudam a prevenir ou reduzir a probabilidade do evento perigoso e/ou suas consequências. A quarta coluna é utilizada para o registro das consequências geradas pelo

desvio avaliado, podendo ser estas consequências relacionadas com a segurança de processos ou com problemas operacionais. Já a quinta, sexta e sétima coluna estão relacionadas com a avaliação de risco. Neste caso, os dados de entrada da planilha são a frequência de ocorrência em anos e a categoria de severidade. O programa elaborado irá, na sétima coluna, calcular automaticamente o valor de risco por meio da teoria de conjuntos *Fuzzy*. Por fim, as recomendações e proposições de melhoria no sistema são registradas na coluna 8 da planilha.

A planilha desenvolvida, que calcula o risco com a lógica nebulosa, será utilizada na aplicação da metodologia HAZOP apresentada no Item 3.6.

3.6 Estudo de caso

Com o objetivo de validar os benefícios gerados pela nova metodologia HAZOP baseada no cálculo de risco utilizando a teoria de conjuntos *Fuzzy*, elaborou-se uma seção HAZOP de uma planta fictícia, adaptada do anexo B da norma IEC 61511-3 revisão de 2016. A seguir apresentam-se o descritivo da planta industrial, bem como as informações da sessão HAZOP.

3.6.1 Sistema proposto: Transferência de produto em um sistema de separação

A metodologia HAZOP será aplicada em um sistema de transferência de produto para um vaso de separação gás/líquido. Neste estudo pretende-se identificar os riscos e problemas operacionais do sistema, bem como calcular os riscos industriais por meio da teoria *Fuzzy*. Apresenta-se na Figura 3.21 e Figura 3.22, respectivamente, o fluxograma de engenharia do processo avaliado e a simbologia e legenda deste fluxograma.

Figura 3.21: Fluxograma de engenharia.

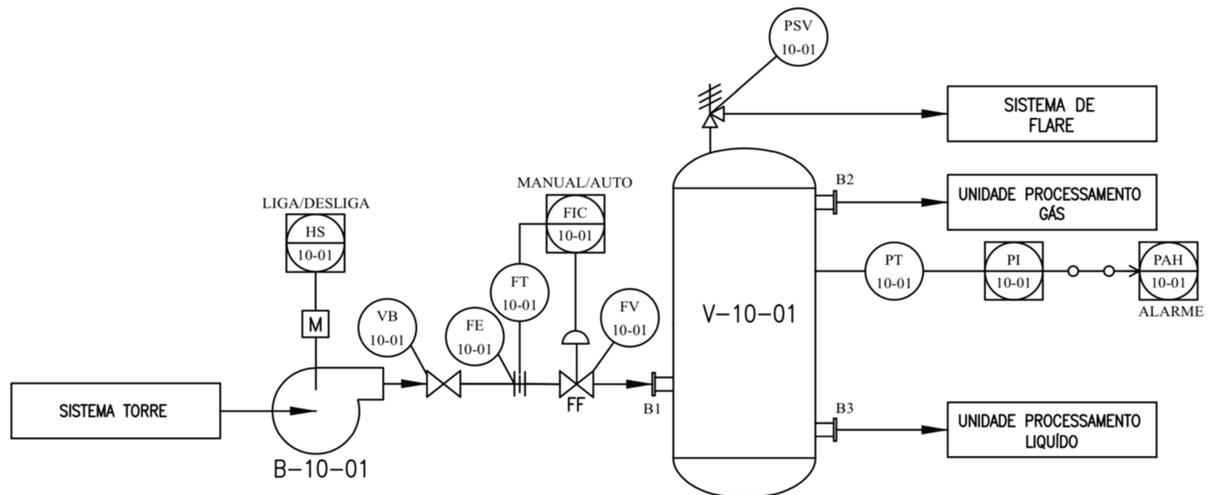


Figura 3.22: Simbologia e legenda do fluxograma de engenharia.

SIMBOLOGIA	LEGENDA
	INSTRUMENTO NO CAMPO
	SINAL CONFIGURADO E VISÍVEL NO SISTEMA E CONTROLE (SDCD)
	VÁLVULA GAVETA
	VÁLVULA DE CONTROLE
	MEDIDOR VAZÃO PLACA E ORIFÍCIO
	BOMBA CENTRÍFUGA
	MOTOR ELÉTRICO
	VASO DE PRESSÃO
	VÁLVULA DE SEGURANÇA
	B-10-01 - BOMBA DE TRANSFERÊNCIA DE PRODUTO
	VB-10-01 - VÁLVULA DE BLOQUEIO MANUAL
	FE-10-01 - PLACA DE ORIFÍCIO
	FIC-10-01 - CONTROLADOR DE VAZÃO CONFIGURADO NO SUPERVISÓRIO
	FT-10-01 - TRANSMISSOR DE VAZÃO (PD)
	FV-10-01 - VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO
	HS-10-01 - CHAVE LIGA/DESLIGA NO SUPERVISÓRIO
	PT-10-01 - TRANSMISSOR DE PRESSÃO
	PI-10-01 - INDICADOR DE PRESSÃO CONFIGURADO NO SUPERVISÓRIO
	PAH-10-01 - ALARME DE PRESSÃO ALTA CONFIGURADO NO SUPERVISÓRIO
	PSV-10-01 - VÁLVULA DE SEGURANÇA E ALÍVIO DE PRESSÃO
	V-10-01 - VASO SEPARADOR GÁS/LIQUÍDO
	FT-10-01 - TRANSMISSOR DE VAZÃO (PD)
	FV-10-01 - CONTROLADOR PID CONFIGURADO NO SDCD

A Figura 3.21 apresenta um processo em que o vaso pressurizado V-10-01 opera com líquido e gás, contendo um bocal de entrada (B1) e dois bocais de saída de produto (B2 e B3). O vaso separador recebe produto em seu bocal B1 por meio de um sistema de bombeamento. Já os bocais B2 e B3 são utilizados, respectivamente, para retirada de gás e de

líquido inflamável. Ainda, conforme ilustrado, o vaso possui medição de pressão (PIT-10-01) e sua tubulação de entrada do vaso conta com um medidor de vazão (FIT-10-01) e uma válvula de controle (FV-10-01), ambos interligados ao sistema de controle de processo da unidade. O controle de processo, configurado no sistema de supervisão e controle (SSC) da unidade, é realizado por meio de uma malha fechada de controle de vazão. Tal malha controla a operação da válvula FV-10-01 a partir do sinal de vazão atual e do valor de referência adotado (*Set-Point*). Este sistema conta com duas camadas de proteção independentes, sendo elas a resposta do operador ao alarme de pressão e a válvula de segurança e alívio de pressão (IEC 61511-3, 2016).

Em caso de sobrepressurização do sistema, inicia-se um alarme de pressão alta que é configurado no sinal medido pelo transmissor de pressão PIT-10-01. Neste caso este alarme de pressão alta tem a função de alertar o operador para que sejam realizadas as ações apropriadas para interromper a entrada de material no vaso V-10-01 (IEC 61511-3, 2016).

Já a válvula de alívio de pressão PSV-10-01, camada de proteção independente do sistema de controle, realizará a despressurização do vaso V-10-01 em caso de falha na tomada de ações do operador. Assume-se que a válvula de alívio de pressão PSV-10-01 é conectada ao sistema de tocha da unidade. Este sistema, por sua vez, conta com um vaso de knock-out que envia os gases para a queima na tocha. Para simplificar a análise, considera-se neste exemplo que o sistema de tocha foi instalado, projetado e é operado normalmente, fazendo com que suas falhas não sejam consideradas na avaliação de risco (IEC 61511-3, 2016).

Neste trabalho, a metodologia HAZOP baseada na lógica *Fuzzy* será aplicada no sistema apresentado na Figura 3.21, seccionado em dois subsistemas, denominados no trabalho como “Nós de estudo”, distintos. O primeiro Nó de estudo corresponde ao sistema de carga do vaso, começando da bomba de carga B-10-01 até o bocal de entrada do vaso B1. Apresenta-se em destaque na Figura 3.23 o primeiro Nó a ser avaliado pelo HAZOP.

Já o segundo Nó está relacionado com o vaso de pressão V-10-01, seus instrumentos associados e sua válvula de segurança. Apresenta-se em destaque na Figura 3.24 o segundo Nó a ser avaliado pelo HAZOP.

Figura 3.23: Primeiro Nó de estudo.

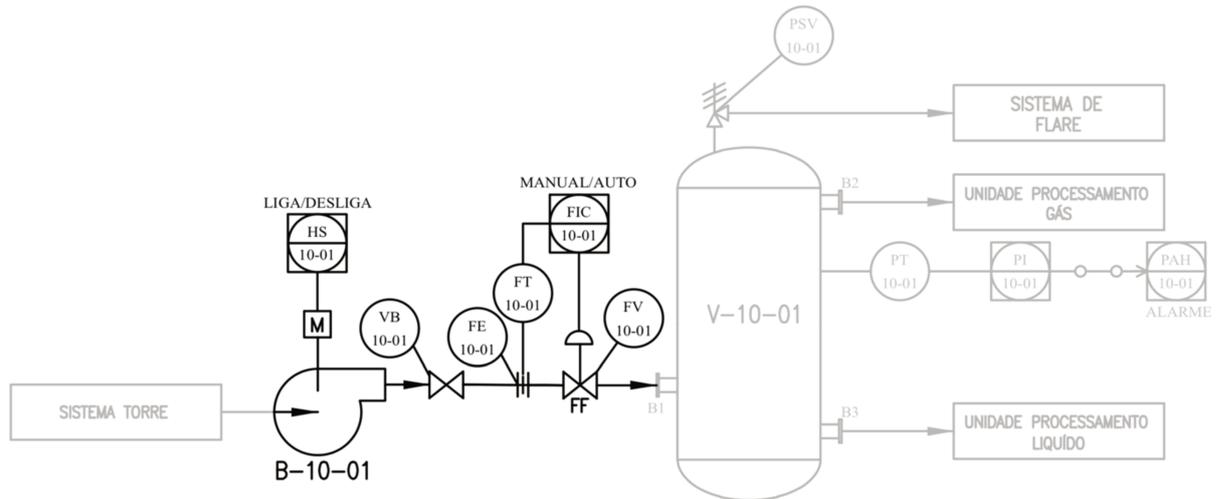
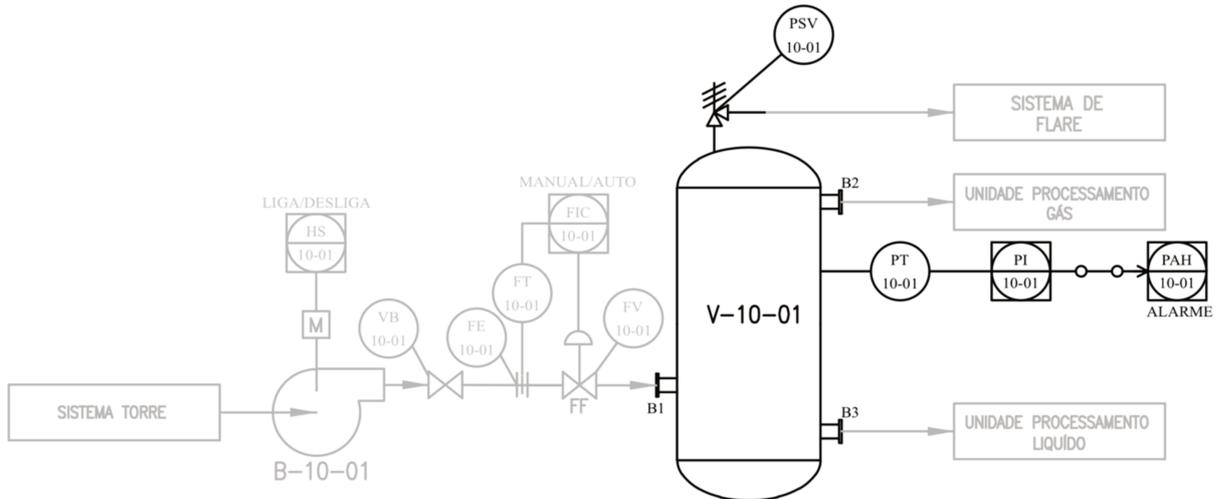


Figura 3.24: Segundo nó de estudo.



Assume-se também como premissa que o vaso separador deve operar sem que ocorra envio do líquido para o circuito de gás através do bocal B2, uma vez que o envio de líquido para o sistema de gás pode danificar equipamentos e ocasionar a parada de produção. Além disso, será assumido que os equipamentos do circuito de gás a jusante do vaso possuem uma limitação na capacidade de processamento, ou seja, a malha de controle de vazão é responsável por manter a vazão de entrada no vaso nos limites operacionais adequados aos sistemas a jusante (IEC 61511-3, 2016)

3.6.2 Realização da Sessões HAZOP

Com o objetivo de validar a nova ferramenta desenvolvida neste trabalho, aplicou-se a metodologia HAZOP no processo ilustrado na Figura 3.21. O HAZOP foi realizado nos

dias 01 e 04 de maio de 2018 em uma sala de reunião localizada nas proximidades da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

As reuniões de avaliação de risco foram conduzidas e lideradas pelo autor deste trabalho e contaram com a presença de um time multidisciplinar envolvendo as áreas de processo, mecânica, elétrica, instrumentação e automação. A lista de presença do HAZOP pode ser verificada no apêndice A do presente trabalho.

A primeira reunião, ocorrida em 01/05/2018, foi iniciada com um “*Brainstorming*” focado no funcionamento do processo industrial apresentado na Figura 3.21. Neste momento, foi feita uma breve discussão acerca das rotinas de operação e das proteções existentes no sistema, tais como válvula de segurança e alarmes.

Feito isso, iniciou-se o processo de identificação e avaliação de risco do primeiro Nó de estudo, apresentado na Figura 3.23, que engloba desde a sucção da bomba B-10-01 até o bocal de entrada B1 do vaso V-10-01. Por definição do time multidisciplinar, optou-se, em primeiro momento, por levantar todos os desvios de processo e suas consequências, realizando a avaliação de risco posteriormente.

A identificação dos riscos iniciou-se com a variável Pressão, sendo que, para esse parâmetro foram verificados os cenários causados pelos desvios de Pressão Alta e Baixa. Em sequência, foram avaliados os desvios gerados pelas variáveis temperatura e vazão. Para o primeiro Nó, o grupo não identificou desvios relacionados com o parâmetro nível. Apresenta-se na Tabela 3.11 exemplos de desvios identificados no Nó 1. A planilha HAZOP completa é apresentada no anexo A do presente trabalho.

Tabela 3.11: Exemplos de desvios identificados.

Desvio	Causas	Consequência
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando queima/danos
<i>VAZÃO BAIXA</i>	Falha na bomba B-10-01 ocasionando parada/trip	Parada de produção com retorno de produção em horas

Ainda no primeiro dia, após o levantamento dos possíveis desvios e suas consequências no primeiro Nó, realizou-se o processo de avaliação de risco. A avaliação de risco foi realizada em duas etapas, sendo a primeira utilizando a matriz de risco convencional e a segunda utilizando o modelo semiquantitativo *Fuzzy* desenvolvido neste trabalho. Os processos de avaliação de risco são apresentados em detalhes nos Itens 3.6.2.1 e 3.6.2.2.

Já no segundo dia da reunião HAZOP, ocorrido em 04/05/2018, iniciou-se o levantamento dos desvios e suas consequências presentes no segundo Nó de estudo, apresentado na Figura 3.24, que engloba o vaso de pressão V-10-01, seus instrumentos associados e sua válvula de segurança. Assim como no primeiro Nó, foram levantados todos os desvios presentes no sistema do vaso V-10-01.

Ao fim do processo de identificação dos cenários de perigo e desvios operacionais, foram levantados 50 (cinquenta) desvios no primeiro Nó de análise e 38 (trinta e oito) desvios no segundo Nó. Em seguida, realizou-se os processos de avaliação de risco descritos nos Itens 3.6.2.1 e 3.6.2.2 deste trabalho.

Por fim, ainda no segundo dia, após o processo de avaliação de risco, foi realizado o processo de propostas de melhorias e recomendações, que tem o objetivo principal de reduzir os principais riscos identificados.

Apresenta-se no Apêndice B deste trabalho a planilha completa elaborada durante as duas sessões de HAZOP ocorridas nos dias 01 e 04 de maio de 2018.

3.6.2.1 Processo de avaliação de risco-convencional

O processo de avaliação de risco convencional foi realizado após a identificação dos riscos existentes nos dois Nós de estudo apresentados, respectivamente, nas Figuras 3.23 e 3.24. Nesta avaliação o grupo considerou sistematicamente todas as causas e consequências dos riscos identificados. Os níveis de frequência, severidade e risco industrial foram categorizados pelo grupo conforme tabelas 2.4, 2.5 e 2.6, , apresentadas no Item 2.2.5 do presente trabalho.

Como exemplo, apresenta-se a categorização convencional realizada pelo grupo para um dos eventos que resulta em danos à bomba de produto B-10-01 por aquecimento. Neste caso, o evento foi identificado pelo grupo através do desvio Pressão Alta, e tem como causa o fechamento da válvula de controle FCV-10-01 por falha da válvula, do transmissor ou da lógica de controle. Assim, através do “*Brainstorming*”, o grupo categorizou a falha da válvula de controle FCV-10-01 como categoria 5, ou seja, conforme matriz de risco convencional, é um evento que pode ocorrer várias vezes durante a vida útil da planta industrial. Para severidade do evento, danos à bomba B-10-01 por aquecimento, o grupo definiu como categoria 3, sendo esta categoria associada a danos materiais consideráveis com parada de produção por semanas.

Por fim, utilizando a matriz de risco convencional apresentada na Tabela 2.6, encontra-se o nível de risco 3,0 para este evento, que é apresentado, juntamente com outros cenários, na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Calculo de risco convencional.

Desvio	Causas	Consequência	Frequência	Severidade	Risco
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	5	2	2,0
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	2	5	2,0
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2,0
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	5	3	3,0
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	5	1	2,0

3.6.2.2 Processo de avaliação de risco-*Fuzzy*

Para todos os riscos identificados nas sessões HAZOP, o grupo avaliou de forma quantitativa a frequência de ocorrência do evento, porém, a severidade ainda foi considerada de maneira qualitativa. Neste caso, o grupo fez uso de taxas de ocorrência típicas de causas iniciadoras utilizadas no setor químico e petroquímico, como por exemplo, os valores apresentados em CCPS (2001) e ilustrados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Valores típicos de causas iniciadoras.

Causa iniciadora	Taxa de Ocorrência (evento/ano)
Falha de vaso de pressão	1 x 10 ⁻⁶
Falha de tubulação – ruptura franca	1 x 10 ⁻⁷ por metro
Vazamento em tubulação – 10 % seção reta	1 x 10 ⁻⁵ por metro
Falha de tanque atmosférico	1 x 10 ⁻³
Falha em juntas	1 x 10 ⁻²
Ruptura de engaxetamento	1 x 10 ⁻²
Sobrevelocidade de turbina / motor diesel com quebra da caixa	1 x 10 ⁻⁴
Impacto externo (por veículo terrestre: caminhão, escavadeira, etc.)	1 x 10 ⁻²
Descarga elétrica atmosférica	1 x 10 ⁻³
Abertura espúria de válvula de segurança	1 x 10 ⁻²
Falha em sistema de água de resfriamento	1 x 10 ⁻¹
Falha de selo de bomba	1 x 10 ⁻¹
Falha de mangote de carregamento / descarregamento	1 x 10 ⁻¹
Falha de malhas no sistema de controle (transmissor, lógica ou válvula)	1 x 10 ⁻¹
Incêndio de pequenas proporções	1 x 10 ⁻¹
Incêndio de grandes proporções	1 x 10 ⁻²
Falha de equipamento estático (alta vibração)	1 x 10 ⁻¹
Falha de equipamento dinâmico	1 x 10 ⁻¹
Erro humano (tarefa rotineira, baixo estresse)	1 x 10 ⁻² por oportunidade
Erro humano (tarefa não rotineira, baixo estresse)	1 x 10 ⁻¹ por oportunidade
Erro humano (tarefa não rotineira, alto estresse)	1 por oportunidade

Fonte: Adaptado de CCPS (2001).

Além disso, durante o processo de avaliação de riscos, o time do HAZOP realizou, para alguns casos, a metodologia de Análise de Árvore de Evento (ETA). Neste caso, foi possível estimar a probabilidade/frequência de uma falha provocar a consequência associada ao evento. Como exemplo, apresentamos a avaliação dos eventos relacionados com o desvio de Pressão Alta no primeiro Nó, causados pela falha da válvula de controle FCV-10-01. Assumiu-se, nesta situação, que a taxa de falha da válvula de controle, ou seja, o evento inicial, é de 1 vez a cada 10 anos. O percentual das falhas secundárias é apresentado na Tabela 3.14.

Tabela 3.14: Exemplos de desvios identificados.

Evento secundário	Probabilidade do evento secundário
Vazamento nos flanges	1 em cada 8 eventos (12,5%)
Aquecimento / Vibração	1 em cada 2 eventos (50%)
Ruptura franca da tubulação	1 em cada 3333 eventos (0,03%)
Parada de produção	1 em cada 1 evento (100%)

Apresenta-se na Figura 3.25 a Análise de Árvore de Evento (ETA) elaborada pelo time do HAZOP para os eventos de Pressão Alta causados pela falha da válvula de controle FCV-10-01.

Figura 3.25: Análise de Árvore de Evento para falha da válvula de controle FCV-10-01.

EVENTO INICIAL	VAZAMENTO NOS FLANGES	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DA VÁLVULA FCV-10-01 0,1 OU 10 ANOS	SIM: 0,125 NÃO: 0,875	VAZAMENTO NOS FLANGES 0,0125 OU 80 ANOS
EVENTO INICIAL	AQUECIMENTO/VIBRAÇÃO	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DA VÁLVULA FCV-10-01 0,1 OU 10 ANOS	SIM: 0,5 NÃO: 0,5	AQUECIMENTO/VIBRAÇÃO 0,05 OU 20 ANOS
EVENTO INICIAL	RUPTURA FRANCA	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DA VÁLVULA FCV-10-01 0,1 OU 10 ANOS	SIM: 0,0003 NÃO: 0,9997	RUPTURA FRANCA 0,00003 OU 33.333 ANOS
EVENTO INICIAL	PARADA DE PRODUÇÃO	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DA VÁLVULA FCV-10-01 0,1 OU 10 ANOS	SIM: 1,0 NÃO: 0,0	PARADA DE PRODUÇÃO 0,1 OU 10 ANOS

Já na Figura 3.26, apresenta-se a Análise de Árvore de Evento (ETA) elaborada para os eventos de Pressão Alta causados pelo fechamento indevido da válvula de controle FCV-10-01 pelo operador.

Figura 3.26: Análise de Árvore de Evento para falha do operador.

EVENTO INICIAL	VAZAMENTO NOS FLANGES	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DO OPERADOR FECHANDO A FCV-10-01 0,2 OU 5 ANOS	SIM: 0,125 NÃO: 0,875	VAZAMENTO NOS FLANGES 0,0250 OU 40 ANOS
EVENTO INICIAL	AQUECIMENTO/VIBRAÇÃO	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DO OPERADOR FECHANDO A FCV-10-01 0,2 OU 5 ANOS	SIM: 0,5 NÃO: 0,5	AQUECIMENTO/VIBRAÇÃO 0,1 OU 10 ANOS
EVENTO INICIAL	RUPTURA FRANCA	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DO OPERADOR FECHANDO A FCV-10-01 0,2 OU 5 ANOS	SIM: 0,0003 NÃO: 0,9997	RUPTURA FRANCA 0,00006 OU 16.666 ANOS
EVENTO INICIAL	PARADA DE PRODUÇÃO	EVENTO/CENÁRIO
FALHA DO OPERADOR FECHANDO A FCV-10-01 0,2 OU 5 ANOS	SIM: 1,0 NÃO: 0,0	PARADA DE PRODUÇÃO 0,2 OU 5 ANOS

Conforme apresentado no Item 3.5 deste trabalho, após o preenchimento da frequência de ocorrência em anos e do grau de severidade, a planilha de HAZOP-*Fuzzy* elaborada calcula o risco utilizando a teoria de conjuntos *Fuzzy*. O cálculo matemático do risco *Fuzzy* é, a princípio, transparente ao time do HAZOP.

Apresenta-se na Tabela 3.15 os níveis de riscos calculados com o modelo semiquantitativo *Fuzzy* para os cenários de Pressão Alta causados pela falha da válvula de controle FCV-10-01.

Tabela 3.15: Regras *Fuzzy* utilizadas para cálculo do Risco

Desvio	Causas	Consequência	Frequência em anos	Severidade	Risco
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	80	2	1,83
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	33.333	5	2,00
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Parada de produção com retorno de produção em horas.	10	2	2,00
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	20	3	2,32
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	20	1	1,32

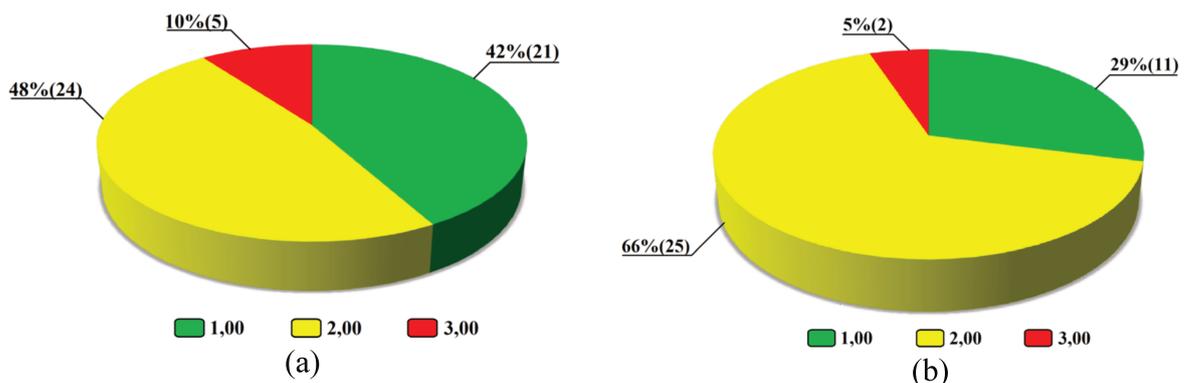
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados desta pesquisa. Primeiramente, são mostrados os resultados obtidos na sessão HAZOP, no qual foi aplicado a avaliação de risco convencional e a avaliação de risco baseada na lógica *Fuzzy*. Em seguida, esses resultados serão avaliados e confrontados, evidenciando assim as diferenças da metodologia convencional e da metodologia desenvolvida no presente trabalho. Por fim, mostram-se os benefícios do uso da metodologia HAZOP-*Fuzzy* na avaliação de risco industrial.

4.1 Resultados da avaliação de risco convencional

A metodologia HAZOP, quando aplicada de maneira convencional nos dois Nós de estudo, apresentou cenários com níveis de risco nas três categorias, sendo elas: tolerável (nível 1,0), moderado (nível 2,0) e não-tolerável (nível 3,0). A distribuição dos riscos nos 50 cenários do primeiro Nó de estudo é apresentada na Figura 4.1 (a). Já a distribuição para o segundo Nó, que conta com 38 cenários, é apresentada na Figura 4.1 (b).

Figura 4.1: Distribuição dos níveis de risco por nó de estudo (a) Nó 1 e (b) Nó 2.

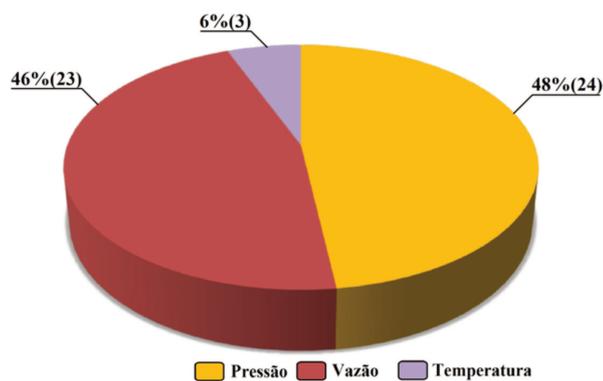


Percebe-se que tanto o primeiro Nó, quanto o segundo, apresentam a maioria dos desvios categorizados como moderado (nível 2,0), categoria que, conforme o princípio ALARP, apresentado no Item 2.1, deve ser reduzida a menos que se demonstre haver uma desproporção óbvia e grosseira entre o custo e os benefícios gerados pela medida de segurança. Nota-se também a presença de 7 (sete) desvios não toleráveis, sendo 5 (cinco) no primeiro Nó e 2 (dois) no segundo Nó, que devem ser, obrigatoriamente, reduzidos.

Em relação ao primeiro Nó, temos 24 (vinte e quatro) desvios relacionados com a variável Pressão, 23 (vinte e três) desvios relacionados com Vazão e 3 (três) desvios relacionados com Temperatura. Apresenta-se graficamente na

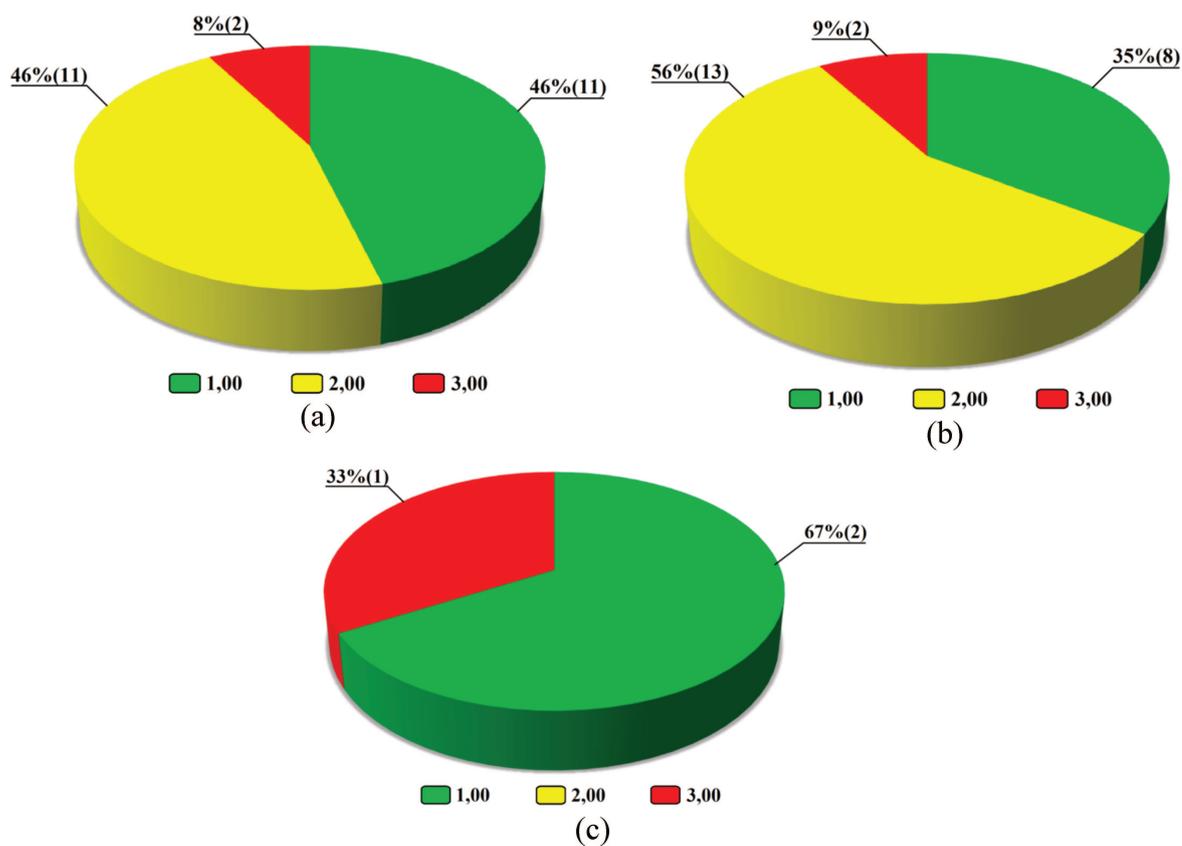
Figura 4.2 a distribuição dos riscos no Nó 1 por cada parâmetro, sendo eles: Pressão, Vazão e Temperatura.

Figura 4.2: Distribuição dos níveis de risco no Nó 1 por variável.



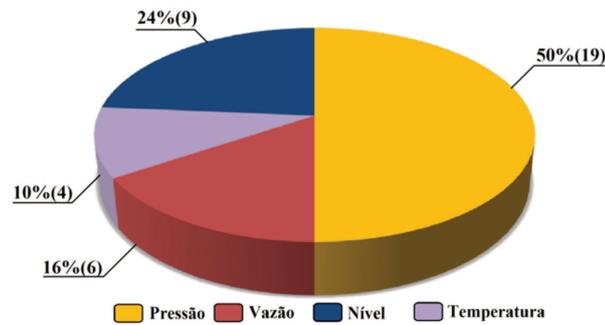
Na Figura 4.3 apresenta-se a distribuição dos níveis de risco em cada um dos parâmetros utilizados na análise do Nó 1.

Figura 4.3: Distribuição dos níveis de risco do Nó 1 em cada variável (a) Pressão, (b) Vazão e (c) Temperatura.



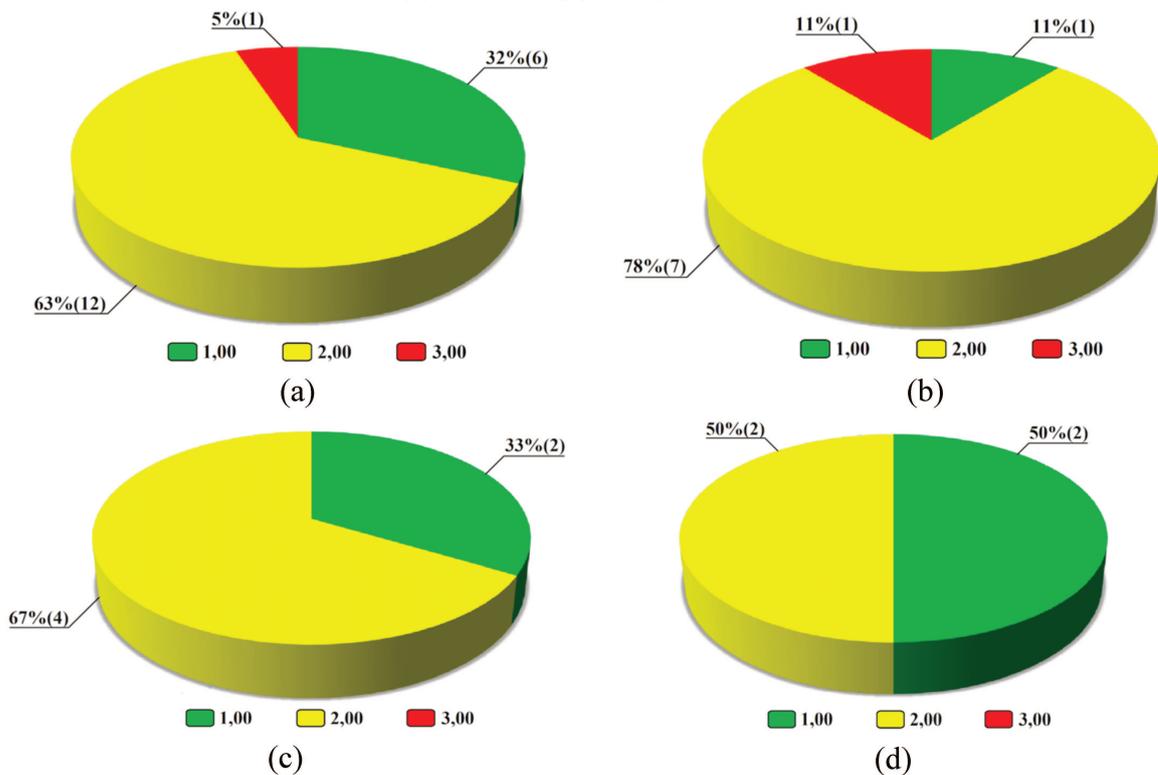
Já no segundo Nó, temos 19 (dezenove) desvios relacionados com a variável Pressão, 9 (nove) relacionados com Nível, 6 (seis) desvios relacionados com Vazão e 4 (quatro) desvios relacionados com Temperatura. Apresenta-se graficamente na Figura 4.4 a distribuição dos riscos no Nó 2 por cada parâmetro, sendo eles Pressão, Temperatura, Vazão e Nível.

Figura 4.4: Distribuição dos níveis de risco no Nó 2 por variável.



Na Figura 4.5 é apresentado a distribuição dos níveis de risco em cada um dos parâmetros utilizados na análise do Nó 2.

Figura 4.5: Distribuição dos níveis de risco do Nó 1 em cada variável (a) Pressão, (b) Nível, (c) Vazão e (d) Temperatura.



Apresenta-se na Tabela 4.1 a média e o desvio padrão dos níveis de riscos identificados no sistema em cada um dos Nós de estudo.

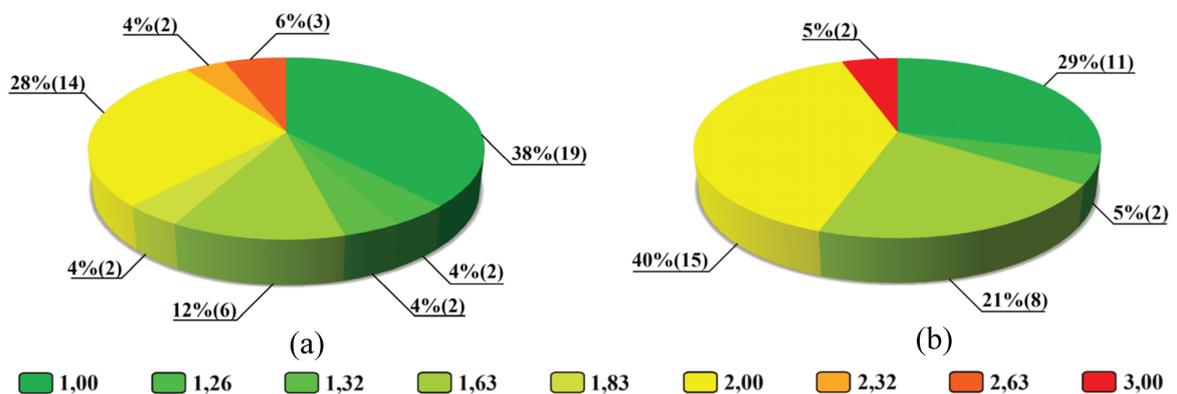
Tabela 4.1: Comparação da média e do desvio padrão no HAZOP convencional.

Categoria	Média (me)	Desvio padrão (dp)
Geral - 88 desvios	1,716	0,605
Nó 1 - 50 desvios	1,680	0,653
Nó 2 - 38 desvios	1,763	0,542

4.2 Resultados da avaliação de risco *Fuzzy*

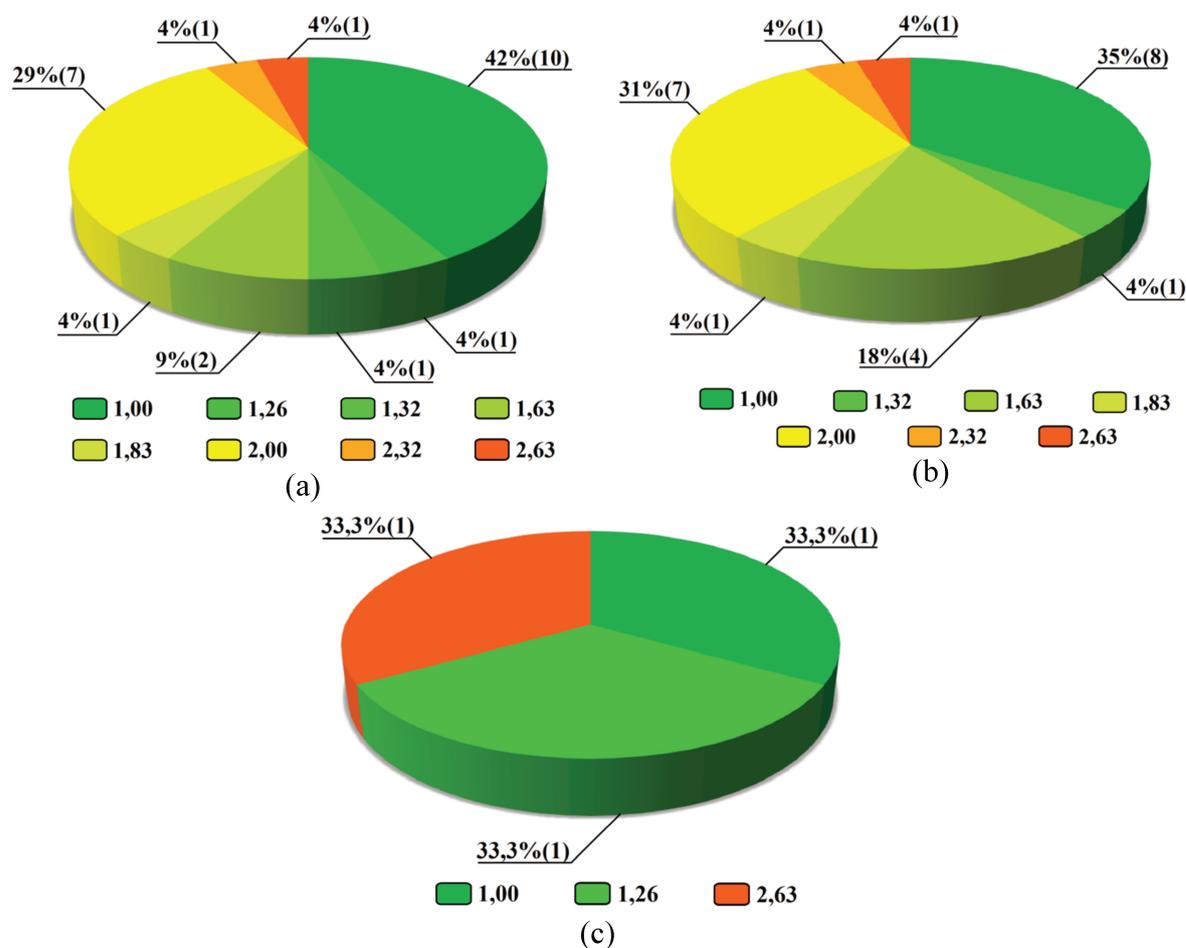
Utilizando valores quantitativos de frequência de ocorrência, pode-se calcular os riscos de todos os desvios encontrados no primeiro e segundo Nó de estudo. Neste caso, a saída de valores de risco é contínua, podendo assumir diversos valores no intervalo entre 1,00 (menor risco) e 3,00 (maior risco). O risco baseado na lógica *Fuzzy* foi calculado para os 50 (cinquenta) cenários do Nó 1 e para os 38 (trinta e oito) cenários do Nó 2. Apresenta-se na Figura 4.6 (a) e Figura 4.6 (b), respectivamente, a distribuição dos riscos no primeiro e no segundo Nó de estudo.

Figura 4.6: Distribuição dos níveis de Risco-*Fuzzy* por nó de estudo (a) Nó 1 e (b) Nó 2.



Em relação aos níveis de risco calculados com o HAZOP-*Fuzzy*, percebe-se que a ferramenta proporciona valores intermediários entre as três categorias do HAZOP convencional, ou seja, os resultados obtidos com a ferramenta são mais suavizados e não-abruptos. Apresenta-se na Figura 4.7 e Figura 4.8 a distribuição dos níveis de risco, por variável, no primeiro e segundo Nó, respectivamente.

Figura 4.7: Distribuição dos níveis de Risco-Fuzzy do Nó 1 em cada variável (a) Pressão, (b) Vazão e (c) Temperatura.

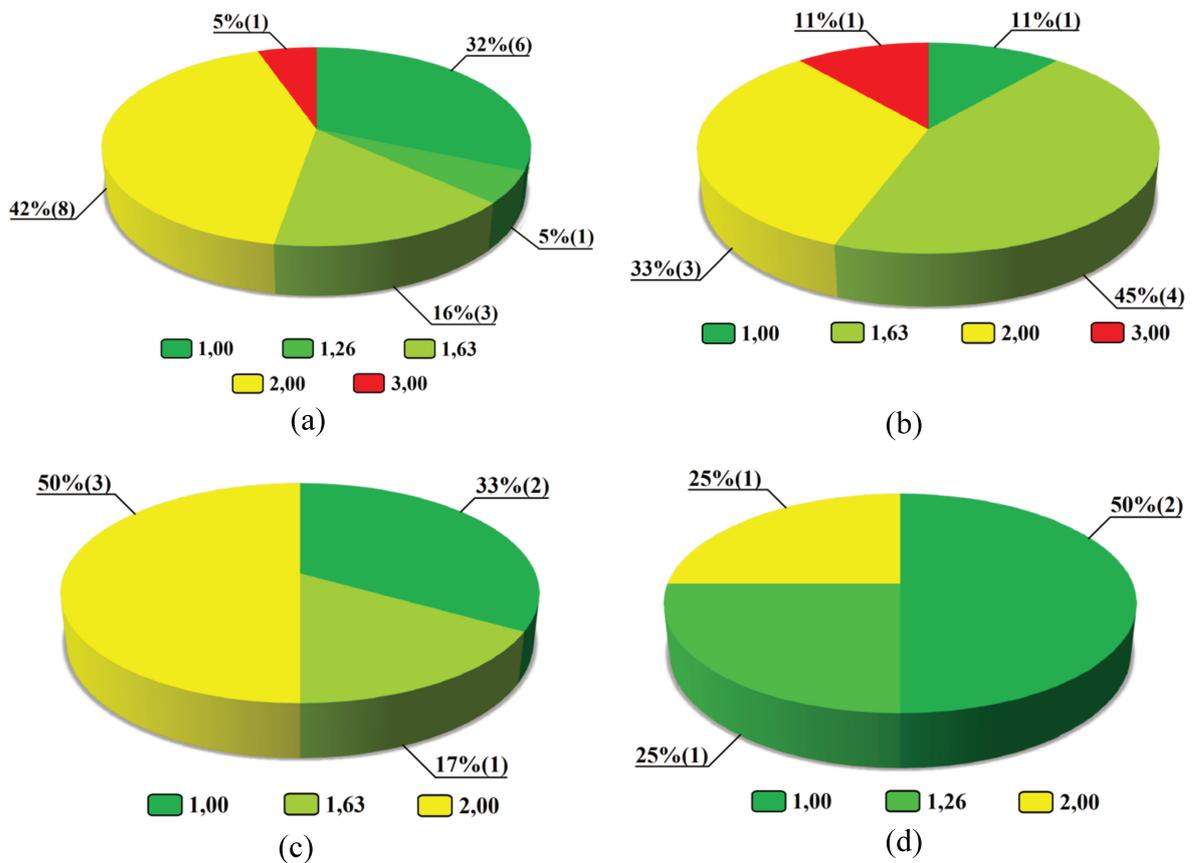


Apresenta-se na Tabela 4.2 a média e o desvio padrão do risco industrial dos riscos identificados no sistema e nos dois Nós de estudo.

Tabela 4.2: Comparação da média e do desvio padrão no HAZOP-Fuzzy.

Categoria	Média (me)	Desvio padrão (dp)
Geral - 88 desvios	1,60	0,529
Nó 1 - 50 desvios	1,56	0,529
Nó 2 - 38 desvios	1,65	0,531

Figura 4.8: Distribuição dos níveis de Risco-*Fuzzy* do Nó 2 em cada variável (a) Pressão, (b) Nível, (c) Vazão e (d) Temperatura.



4.3 Comparativo entre a avaliação de risco convencional e *Fuzzy*.

O HAZOP-*Fuzzy* consegue calcular o risco de forma contínua, realizando a transição gradual entre as categorias de risco do HAZOP convencional. Em 69,3% dos casos, 61 (sessenta e um) cenários do total de 88 (oitenta e oito), os riscos calculados no HAZOP-*Fuzzy* e no HAZOP convencional apresentam os mesmos valores. Porém, em 30,7% dos casos, 27 (vinte e sete) cenários, o HAZOP-*Fuzzy* apresentou valores de risco diferentes do HAZOP convencional. Percebe-se que os cenários que apresentam diferenças de valores são cenários em que a análise quantitativa da frequência conseguiu diminuir as incertezas da avaliação qualitativa por meio de valores típicos de falha e uso da metodologia de Análise de Árvore de Evento (ETA).

A título de exemplo, mostra-se na Tabela 4.3 alguns cenários do primeiro Nó que apresentaram diferença entre os valores de riscos obtidos no HAZOP convencional e na metodologia utilizando a lógica *Fuzzy*. A planilha HAZOP completa pode ser verificada no apêndice B do presente documento.

Tabela 4.3: Riscos calculados no Hazop Convencional e HAZOP-*Fuzzy*.

Desvio	Causas	Consequência	Risco	Risco-<i>Fuzzy</i>
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	2,00	1,83
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	2,00	2,00
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Parada de produção com retorno de produção em horas.	2,00	2,00
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	3,0	2,32
<i>PRESSÃO ALTA</i>	Falha da válvula de controle FCV-10-01 fechando 100%	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	2,00	1,32

De maneira geral, o risco calculado com a lógica Nebulosa possui grau de magnitude menor, o que sugere que os dados quantitativos de frequência puderam aumentar a assertividade da estimativa de risco, ou seja, diminuir a incerteza da avaliação de risco no modelo convencional de HAZOP. Apresenta-se na Tabela 4.4 o valor médio e o desvio padrão dos níveis de risco identificados pelas metodologias HAZOP convencional e HAZOP-*Fuzzy*.

Tabela 4.4: Comparação da média e do desvio padrão entre HAZOP convencional e *Fuzzy*.

Categoria	Média (me)		Desvio padrão (dp)	
	Convencional	<i>Fuzzy</i>	Convencional	<i>Fuzzy</i>
Geral - 88 desvios	1,716	1,60	0,605	0,529
Nó 1 - 50 desvios	1,680	1,56	0,653	0,529

Nó 2 - 38 desvios	1,763	1,65	0,542	0,531
-------------------	-------	------	-------	-------

Percebe-se que, de maneira geral, o uso de dados quantitativos possibilitou a redução dos valores estimados de riscos, o que leva a crer que tais valores apresentavam-se superestimados no processo convencional.

O uso da metodologia *Fuzzy* viabilizou uma redução do valor médio de risco de cerca de 6,75% no sistema. No primeiro Nó, a redução do valor médio de risco utilizando a metodologia *Fuzzy* foi de 7,14%. Já no segundo Nó, o valor percentual de redução foi de 6,41%.

O cálculo de risco *Fuzzy* permite que a priorização dos riscos seja realizada de forma sofisticada, uma vez que segregava numericamente diversos riscos que, pela metodologia convencional, estariam no mesmo patamar de risco. Um exemplo disso são os riscos de nível 3,0 apresentados no primeiro e segundo Nó de estudo. Veja que no HAZOP convencional temos cinco desvios com nível 3,0, o que nos leva a entender que todos devem ser tratados com a mesma atenção. Porém, verifica-se que, com o cálculo do risco *Fuzzy*, tem-se a presença de três riscos de nível 3,0 e dois com magnitude de 2,63. Neste caso, o uso do HAZOP-*Fuzzy* possibilita uma priorização no tratamento dos riscos, uma vez que estes deixaram de estar no mesmo patamar.

A lógica *Fuzzy* torna o processo de tomada de decisões e implantação de medidas de redução de risco mais efetivo, já que permite a visualização de riscos que antes estavam situados na mesma categoria e que agora podem ser tratados e priorizados separadamente de acordo com sua magnitude.

A categoria de severidade utilizada na obtenção do risco foi a mesma para a metodologia convencional e *Fuzzy*. Logo, apesar da metodologia *Fuzzy* mapear a entrada Severidade no universo *Fuzzy* por meio das funções de pertinência, a variável não tem grande influência no valor do cálculo do risco-*Fuzzy*, assumindo, em qualquer situação, valor de pertinência de 0 ou 1. A Frequência é a variável que tem o maior impacto no cálculo do risco no universo *Fuzzy*, uma vez que é calculada de maneira contínua e determina, por meio do operador E do modelo de inferência Mandami, a saída de cada regra *Fuzzy*.

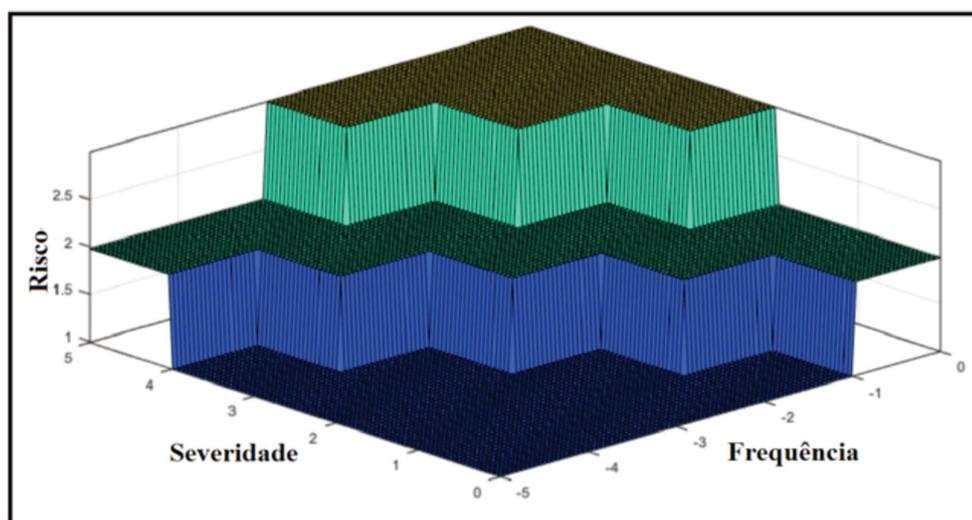
De maneira geral, vimos que a metodologia *Fuzzy*, ao incorporar valores quantitativos de frequência no cálculo de risco, consegue diminuir a subjetividade e imprecisão apresentadas na avaliação de risco convencional, que usa categorias qualitativas. No estudo de caso apresentado no item 3.6, percebeu-se que os valores de risco obtidos pelo HAZOP

convencional são mais conservadores e superestimados, o que pode refletir em gastos excessivos e desnecessários com medidas de redução de risco.

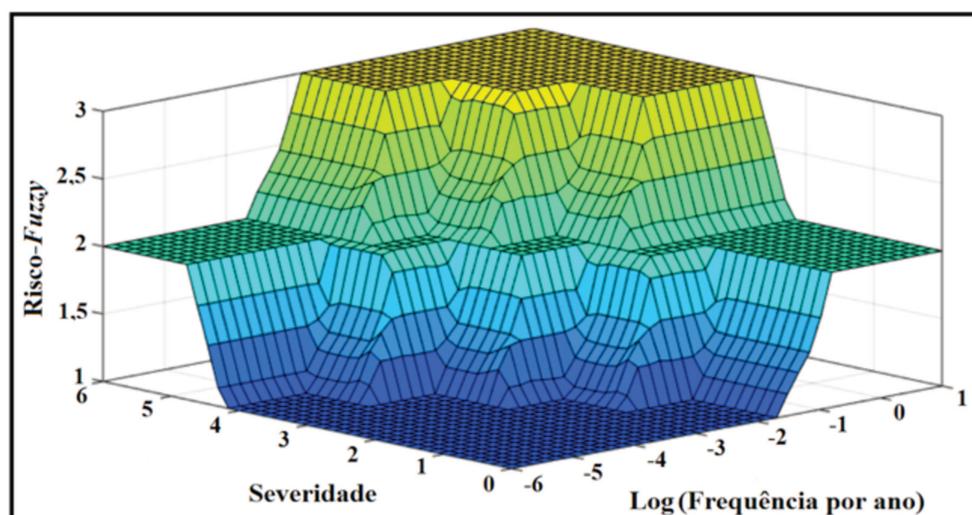
Entretanto, deve-se ressaltar que o uso da técnica de Análise de Árvore de Evento (ETA) no HAZOP pode aumentar consideravelmente os esforços, tempo e custo na aplicação da metodologia. Logo, recomenda-se que tal técnica seja utilizada apenas em cenários de maior criticidade, ou seja, cenários que possuem uma alta severidade das consequências.

Pode-se evidenciar na visão de superfície das matrizes de risco convencional e *Fuzzy*, apresentadas na Figura 4.9 (a) e (b), a diferença na transição das categorias de risco, sendo esta transição abrupta e discreta na matriz convencional e contínua e gradual na matriz de risco *Fuzzy*.

Figura 4.9: Superfície do risco (a) convencional e (b) *Fuzzy*.



(a)



(b)

5 CONCLUSÕES

A metodologia HAZOP desenvolvida neste trabalho, baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy*, foi capaz de reduzir incertezas inerentes à avaliação qualitativa da metodologia HAZOP convencional, que utiliza categorias qualitativas de Frequência e Severidade para o cálculo do risco industrial.

Quando comparado à matriz de risco convencional, o risco obtido com o auxílio da teoria dos conjuntos *Fuzzy* se mostrou mais realista e preciso, posto que o Risco-*Fuzzy* apresenta uma transição gradual e contínua entre as categorias da matriz de risco.

Ainda, os riscos obtidos no cálculo *Fuzzy*, com o auxílio de dados quantitativos, foram, de maneira geral, menores. Neste caso, pode-se inferir que no processo puramente qualitativo de avaliação os riscos foram superestimados. A superestimação dos riscos é um problema, visto que sua redução para os patamares aceitáveis, conforme critérios de tolerabilidade e aceitabilidade, está associada a proposição de medidas que refletem em custos financeiros.

Constata-se também que o processo de avaliação de riscos baseado na lógica Nebulosa foi capaz de, por meio da manipulação das funções de pertinência e da elaboração das regras de inferência, incorporar a experiência humana dos especialistas em segurança industrial no cálculo matemático do risco. Neste trabalho, tal experiência advém do uso da matriz de risco e critérios de tolerabilidade, que traduzem valores típicos da indústria química e petroquímica, e são as bases para a definição das funções de pertinência.

Além disso, verificou-se que a metodologia de cálculo de risco proposta no presente trabalho permite a incorporação de dados reais de taxa de ocorrência de um determinado evento perigoso, o que minimiza as incertezas na estimativa do risco industrial, já que o processo deixa de ser puramente qualitativo tornando-se semiquantitativo.

Os resultados obtidos permitem concluir que o uso da lógica *Fuzzy* na avaliação de risco gera melhorias na segurança industrial, uma vez que pode reduzir as incertezas e melhorar os resultados dos processos de avaliação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos no uso da técnica de inteligência artificial na metodologia HAZOP foram promissores e instigam a realização de trabalhos futuros. Apresenta-se a seguir algumas sugestões:

- Realizar o cálculo do Risco-*Fuzzy* considerando a severidade como parâmetro quantitativo e contínuo. Pode-se neste caso, utilizar valores quantitativos em gastos financeiros, volume de produto vazado e, no caso de consequências a pessoas, grau de nível de dano aos trabalhadores.
- Avaliar e comparar as diferenças de esforços, custos e prazos da aplicação da metodologia HAZOP-*Fuzzy* em comparação a metodologia HAZOP convencional.
- Aplicar outras técnicas de inteligência artificial no cálculo do risco, tais como Redes Neurais, Redes Neurais *Fuzzy* e Algoritmos Genéticos.
- Integrar no cálculo de risco *Fuzzy* dados quantitativos de frequência de ocorrência e falha de banco de dados renomados da indústria de processo, tais como Exida FMEDA (do Inglês, “Effects, and Diagnostic Analysis”) e OREDA (do Inglês, “The Offshore and Onshore Reliability Data”).
- Investigar a influência do uso de outras funções de pertinência nos resultados de risco obtidos na metodologia *Fuzzy*. Pode-se, por exemplo, utilizar funções de pertinência do tipo sino, gaussiana e triangular.
- Utilizar técnicas de inteligência artificial para a definição de medidas de redução de risco, tais como o cálculo do nível de integridade de funções de segurança (SIL do Inglês, – “Safety Integrity Level”).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHN, J.; CHANG, D. Fuzzy-based HAZOP study for process industry. **Journal of hazardous materials**, v. 317, p. 303-311, 2016.
- ALBERTON, A. Uma metodologia auxiliar no gerenciamento de riscos e na seleção alternativa de investimentos em segurança. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1996.
- ALE, B. J. M. Tolerable or Acceptable: A Comparison of Risk Regulation in the United Kingdom and in the Netherlands, **Risk Analysis**, v. 25, n. 2, p. 231-241, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000**: gestão de riscos - princípios e diretrizes. norma técnica. Rio de Janeiro, 2009. 24 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/IEC 31010**: gestão de riscos-técnicas para o processo de avaliação de riscos, Rio de Janeiro, 2012. 96 p.
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. **Guidelines for Safe and Reliable Instrumented Protective Systems**. John Wiley & Sons, Inc., Chichester-UK, 2007. 430 p.
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. **Layer of Protection Analysis Simplified Process Risk Assessment**. CCPS, New York, 2001. 270 p.
- CRAWLEY, F.; TYLER, B. **HAZOP: Guide to Best Practice Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries**. 3. Ed., Elsevier, 2015. 168 p.
- DUBOIS, D.; PRADE, H. The mean value of a fuzzy number. **Fuzzy Sets and Systems**. v. 24, p. 279–300, 1987.
- ERICSON, C. A. **Hazard Analysis Techniques for System Safety**. 2. Ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken-NJ, 2015. 640 p.
- HEALTH & SAFETY EXECUTIVE. **Reducing risks, protecting people: HSE's decision-making process**. HSE Books, Norwich-UK, 2001. 88 p.
- HEALTH & SAFETY EXECUTIVE. **The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations**. HSE Books, London-UK, 1992. 65 p.
- KAPLAN, S.; GARRICK, B, J. On the qualitative definition of risk. **Risk Analysis**, v. 1, p. 11-27, 1981.
- KING, R. **Safety in the Process Industries**. Butterworth-Heinemann, 1990. 780 p.
- KLETZ, T. A. **Hazop & Hazan: Identifying and Assessing Process Industry Hazards**. 4. Ed, IchemE, 1999. 232 p.
- KLETZ, T. A. **What Went Wrong?**. 5. Ed, Butterworth-Heinemann; 2009. 640 p.

- LEES, F. **Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control**. 4. Ed., Butterworth-Heinemann, 2012. 3776 p.
- LEVESON, N. A new accident model for engineering safer systems. **Safety Science**, v. 42, p. 237-270, 2004.
- LIANG, W.; ZHANG, L.; HU, J. Fuzzy information fusion based quantitative HAZOP analysis for gas compressor units. Anais: **GCIS'09. WRI Global Congress on Intelligent Systems**, p. 423-427, Washington DC, 2009.
- LLORY, M. **Acidentes Industriais: o custo do silêncio**. Editora MultiMais, Rio de Janeiro, 1999.
- MANNAN, M. S. **Lees' Process Safety Essentials: Hazard Identification, Assessment and Control**. Butterworth-Heinemann, 2013. 570 p.
- MARKOWSKI, A. S.; MANNAN, M. S.; BIGOSZEWSKA, A. Fuzzy logic for process safety analysis. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. v. 22, p. 695–702, 2009.
- MARRO, A. A. et al. **Lógica Fuzzy: conceitos e aplicações**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO (MTb). NR 20: segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e Combustíveis. **Portaria MTb n. 872**, 06/07/2017. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR20.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2018.
- MOZELLI, L. A. Controle Fuzzy para sistemas Takagi-Sugeno: Condições aprimoradas e aplicações. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- NASCIMENTO, J. E. Programa de Gerenciamento de Segurança de Processo em Plantas Químicas e Petroquímicas com base nas normas API RP 750 e ABNT NBR 15662. Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.
- NUNES, F.C. et al. Impactos Ambientais Causados por vazamento de Petróleo no Golfo do México. Anais: **I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, Campina Grande, 2015.
- PENG-CHENG, L.; GUO-HUA, C.; LI-CAO, D.; ZHANG, L. Fuzzy logic-based approach for identifying the risk importance of human error. **Safety Science**, v. 48, p. 902–913, 2010.
- QUINTELLA, M. C. Adaptação e aplicação da técnica HAZOP na identificação de risco na área de serviço de saúde: estudo de caso HEMOCENTRO/UNICAMP. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- RASMUSSEN, N. C. **Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants**, Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1975.

-
- RAUSAND, M. **Risk assessment: theory, methods, and applications**. John Wiley & Sons, Inc., 2011. 664 p.
- ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 3. Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2010. 585 p.
- SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica Nebulosa. V **Escola de Redes Neurais**, p. 73-90, São José dos Campos, 1999.
- SHAW, I. S.; SIMÕES M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2. Ed., Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2007. 200 p.
- SII, H.S.; WANG, J.; RUXTON, T. Novel risk assessment techniques for maritime safety management system. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 18, p. 982-1000, 2001.
- STAPELBERG, R. F. **Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design**. Springer, 2009. 798 p.
- THE INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61511-3: functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector. Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels**, 2016. 100p.
- THE MATHWORKS, **Fuzzy Logic Toolbox User's Guide - R2017a**. The Mathworks inc., Disponível em: <<http://www.mathworks.com>> Acesso em: 05 de jun. de 2017.
- WALL, K. D. **The Kaplan and Garrick Definition of Risk and its Application to Managerial Decision Problems**. DRMI - Naval Postgraduate School, July 29, 2011.
- ZADEH, L.A. Fuzzy sets, **Information Control**. v.8, p. 338–353, 1965.

APÊNDICE A - ATA DE REUNIÃO HAZOP-FUZZY

LISTA DE PRESENÇA – HAZOP

1



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

LISTA DE PRESENÇA – ESTUDO HAZOP

Este documento tem o objetivo de apresentar os participantes das reuniões HAZOP (“*Hazard and Operability Study*”) para avaliação de risco da planta de processo fictícia apresentada no estudo de caso (item 3.6) da dissertação do aluno Pedro Henrique Sousa Prado intitulada: **METODOLOGIA HAZOP BASEADA NA TEORIA DE CONJUNTOS FUZZY: UMA AVALIAÇÃO SEMIQUANTITATIVA DO RISCO INDUSTRIAL NA INDÚSTRIA DE PROCESSOS**. As reuniões ocorreram nos dias 01 e 04 de maio de 2018 em uma sala de reunião localizada nas proximidades da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Além disso, por meio deste documento, os participantes autorizam a divulgação de todas informações do HAZOP como parte integrante da dissertação de mestrado do referido aluno.

Nome	Especialidade	Assinatura
Adilson Pires Afonso	PROCESSO	
Bruno Celotti	PROCESSO	
Claudinei Brolo	MECÂNICA	
Elmer Denis	ELÉTRICA	
Pedro Henrique Sousa Prado (LIDER)	INSTRUMENTAÇÃO AUTOMAÇÃO	

CAMPINAS

2018

APÊNDICE B – PLANILHA HAZOP FUZZY

SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado										
PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
1	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	5	2	2	80	2	1,83
2	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	2	5	2	33333,33333	5	2,00
3	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
4	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	5	3	3	20	3	2,32
5	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	5	1	2	20	1	1,32
6	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	5	2	2	40	2	2,00

SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado										
PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
7	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	2	5	2	16666,66667	5	2,00
8	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	5	2	2,00
9	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	5	3	3	10	3	2,63
10	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	5	1	2	10	1	1,63
11	PRESSÃO ALTA	Desvio na malha de controle fazendo com que a FCV-01 trabalhe com abertura menor	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação <i>flash</i>)	4	1	1	50	1	1,00
12	PRESSÃO ALTA	Desvio na malha de controle fazendo com que a FCV-10-01 trabalhe com abertura	Não existem salvaguardas para este cenário.	Aquecimento e vibração da bomba B-10-01 causado por operação em vazão abaixo da	4	1	1	50	1	1,00
13	PRESSÃO ALTA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	3	2	1	4000	2	1,00
14	PRESSÃO ALTA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	1	5	2	1666666,667	5	2,00

SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado										
PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
15	PRESSÃO ALTA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	3	2	1	500	2	1,00
16	PRESSÃO ALTA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo	3	3	2	1000	3	1,63
17	PRESSÃO ALTA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e	3	1	1	1000	1	1,00
18	PRESSÃO ALTA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo causando confinamento de produto entre bloqueio.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação causado pelo aumento de pressão. A sobrepressurização é causada, neste caso, pela expansão térmica do fluido confinado entre bloqueios.	3	2	1	4000	2	1,00
19	PRESSÃO ALTA	Alta pressão causada por erro na especificação da bomba B-10-01 (Ex: rotor acima do projeto) ou erro no fornecimento da bomba.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação flash) Controlabilidade da válvula de controle FV-10-01 é prejudicada pois a mesma trabalhará fora do range recomendado (10% a 90% de abertura), ou seja, indução de não linearidades no controle em malha fechada.	3	1	1	50	1	1,00
20	PRESSÃO ALTA	Alta pressão causada por erro na especificação da bomba B-10-01 (Ex: rotor acima do projeto) ou erro no fornecimento da bomba.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Problemas no custo de operação da planta, uma vez que a válvula de controle FV-10-01 irá reduzir a abertura para fechar o balanço de pressão (alta perda de carga).	3	1	1	50	1	1,00

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
21	PRESSÃO ALTA	Incêndio externo (Fogo)	Não existem salvaguardas para este cenário.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	3	2	1	250	2	1,26
22	PRESSÃO BAIXA	Falha na bomba B-10-01 ocasionando (parada/trip)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
23	PRESSÃO BAIXA	Baixa pressão causada por erro na especificação da bomba B-10-01 (Ex: rotor	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação	3	1	1	50	1	1,00
24	PRESSÃO BAIXA	Baixa pressão causada por erro na especificação da bomba B-10-01 (Ex: rotor abaixo do projeto) ou erro no fornecimento da bomba.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Produção abaixo do projeto da planta, ocasionando impactos financeiros.	3	1	1	50	1	1,00
25	TEMPERATURA ALTA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo causando confinamento de produto entre bloqueio. Variação de temperatura do ambiente.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação causado pelo aumento de pressão. A sobrepressurização é causada, neste caso, pela expansão térmica do fluido confinado entre bloqueios.	3	2	1	4000	2	1,00
26	TEMPERATURA ALTA	Incêndio externo (Fogo)	Não existem salvaguardas para este cenário.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação causado pelo aumento de pressão. A sobrepressurização é causada, neste caso, pela expansão térmica do fluido confinado entre bloqueios.	3	2	1	250	2	1,26
27	TEMPERATURA ALTA	Bloqueio ou obstrução no sistema de sucção ou descarga da bomba B-10-01 (falhas de malha de controle), causando aumento de temperatura.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	5	3	3	10	3	2,63

SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado										
PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
28	VAZÃO ALTA	Alta vazão causada por erro na especificação da bomba B-10-01 (Ex: rotor acima do projeto) ou erro no fornecimento da bomba.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação flash) Controlabilidade da válvula de controle FV	3	2	1	50	1	1,00
29	VAZÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-01 falhando aberta. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação flash)	5	1	2	10	1	1,63
30	VAZÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com abertura indevida comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação flash)	5	1	2	5	1	2,00
31	VAZÃO BAIXA	Falha na bomba B-10-01 ocasionando (parada/trip)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
32	VAZÃO BAIXA	Bloqueio ou obstrução parcial no sistema de sucção o descarga da bomba B-10-01, causando aumento de temperatura.	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	"Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação flash) Controlabilidade da válvula de controle FV-10-01 é prejudicada pois a mesma trabalhará fora do range recomendado (10% a 90% de abertura), ou seja, indução de não linearidades no controle em malha fechada."	5	1	2	10	1	1,63
33	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	5	2	2	80	2	1,83

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
34	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	2	5	2	33333,33333	5	2,00
35	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
36	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	5	3	3	20	3	2,32
37	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	5	1	2	20	1	1,32
38	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação.	5	2	2	40	2	2,00
39	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Ruptura franca da tubulação ocasionando vazamento em grandes proporções.	2	5	2	16666,66667	5	2,00
40	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	5	2	2,00

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
41	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	5	3	3	10	3	2,63
42	VAZÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo operador (Controlador PID em manual)	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula, uma vez que a vazão nula é facilmente percebida pela equipa de operação.	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	5	1	2	10	1	1,63
43	VAZÃO BAIXA	Desvio na malha de controle fazendo com que a FCV-01 trabalhe com abertura menor	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação <i>flash</i>)	4	1	1	50	1	1,00
44	VAZÃO BAIXA	Desvio na malha de controle fazendo com que a FCV-10-01 trabalhe com abertura menor	Não existem salvaguardas para este cenário.	Aquecimento e vibração da bomba B-10-01 causado por operação em vazão abaixo da vazão mínima recomendada pelo fabricante. Reparo dos dados em horas.	4	1	1	50	1	1,00
45	VAZÃO BAIXA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	3	2	1	500	2	1,00
46	VAZÃO BAIXA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Aquecimento da bomba B-10-01 ocasionando danos ao equipamento (fluxo nulo). Reparo ocorrerá em dias.	3	3	2	1000	3	1,63
47	VAZÃO BAIXA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Vibração excessiva da bomba B-10-01, podendo causar desalinhamento e problemas nos mancais.	3	1	1	1000	1	1,00
48	VAZÃO BAIXA	Fechamento indevido da válvula de bloqueio manual VB-10-01 pelo operador de campo causando confinamento de produto entre bloqueio.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Pequeno vazamento de produto nos flanges da tubulação causado pelo aumento de pressão. A sobrepressurização é causada, neste caso, pela expansão térmica do fluido confinado entre bloqueios.	3	2	1	4000	2	1,00

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LIQUIDO NÓ 01: DA ENTRADA DA BOMBA DE EXPEDIÇÃO B-10-01 ATÉ O BOCAL DE ENTRADA DE PRODUTO B3 PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
49	VAZÃO BAIXA	Alta pressão causada por erro na especificação da bomba B-10-01 (Ex: rotor acima do projeto) ou erro no fornecimento da bomba.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação flash) Controlabilidade da válvula de controle FV-10-01 é prejudicada pois a mesma trabalhará fora do range recomendado (10% a 90% de abertura), ou seja, indução de não linearidades no controle em malha fechada.	3	1	1	50	1	1,00
50	VAZÃO BAIXA	Alta pressão causada por erro na especificação da bomba B-10-01 (Ex: rotor acima do projeto) ou erro no fornecimento da bomba.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Problemas no custo de operação da planta, uma vez que a válvula de controle FV-10-01 irá reduzir a abertura para fechar o balanço de pressão (alta perda de carga).	3	1	1	50	1	1,00

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LIQUIDO NÓ 02: VASO DE PRESSÃO V-10-01, SEUS INSTRUMENTOS ASSOCIADOS E SUA VÁLVULA DE SEGURANÇA. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
1	PRESSÃO ALTA	Bloqueio no sistema de gás, impedindo assim a saída de gás do vaso V-10-01	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Pequeno vazamento de produto nos flanges do vaso V-10-01	3	2	1	8000	2	1,00
2	PRESSÃO ALTA	Bloqueio no sistema de gás, impedindo assim a saída de gás do vaso V-10-01	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Ruptura franca do vaso V-10-01	2	5	2	10000000	5	2,00
3	PRESSÃO ALTA	Bloqueio no sistema de gás, impedindo assim a saída de gás do vaso V-10-01	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
4	PRESSÃO ALTA	Bloqueio no sistema de líquido, impedindo assim a saída de líquido do vaso V-10-01	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Pequeno vazamento de produto nos flanges do vaso V-10-01	3	2	1	8000	2	1,00
5	PRESSÃO ALTA	Bloqueio no sistema de líquido, impedindo assim a saída de líquido do vaso V-10-01	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no	Ruptura franca do vaso V-10-01	2	5	2	10000000	5	2,00

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 02: VASO DE PRESSÃO V-10-01, SEUS INSTRUMENTOS ASSOCIADOS E SUA VÁLVULA DE SEGURANÇA. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
6	PRESSÃO ALTA	Bloqueio no sistema de líquido, impedindo assim a saída de líquido do vaso V-10-01	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
7	PRESSÃO ALTA	Bloqueio no sistema de líquido, impedindo assim a saída de líquido do vaso V-10-01	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Envio de líquido do V-10-01 para o sistema de gás, causando danos á equipamentos.	5	4	3	50	4	3,00
8	PRESSÃO ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Pequeno vazamento de produto nos flanges do vaso V-10-01	3	2	1	2500	2	1,00
9	PRESSÃO ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Ruptura franca do vaso V-10-01	2	5	2	25000	5	2,00
10	PRESSÃO ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Desvio na qualidade do produto final (separação flash), uma vez que o aumento de temperatura do vaso V-10-01 irá ocasionar o aumento da vaporização, gerando mais gás e menos líquido.	3	1	1	2500	1	1,00
11	PRESSÃO ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme	Danos a integridade do V-10-01 causados pela sobrepressurização.	3	3	2	2500	3	1,26

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 NÓ 02: VASO DE PRESSÃO V-10-01, SEUS INSTRUMENTOS ASSOCIADOS E SUA VÁLVULA DE SEGURANÇA. REVISÃO: 0 PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
12	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando aberta. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação <i>flash</i>)	5	1	2	10	1	1,63
13	PRESSÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando aberta. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervísório.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação <i>flash</i>)	5	1	2	10	1	1,63
14	PRESSÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de	- Transmissor de pressão PT-10-01.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
15	PRESSÃO BAIXA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo	- Transmissor de pressão PT-10-01.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	5	2	2,00
16	PRESSÃO BAIXA	Falha na bomba B-10-01 ocasionando (parada/trip)	- Transmissor de pressão PT-10-01.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
17	PRESSÃO BAIXA	Desvio na malha de controle fazendo com que a FCV-01 trabalhe com abertura menor	- Transmissor de pressão PT-10-01.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação <i>flash</i>)	4	1	1	100	1	1,00
18	PRESSÃO BAIXA	Problemas na válvula de alívio e segurança (PSV-10-01) ocasionando a abertura espúria da válvula, ou seja, abertura da válvula abaixo da pressão de ajuste.	- Transmissor de pressão PT-10-01.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação <i>flash</i>)	4	1	1	100	1	1,00

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO NÓ 02: VASO DE PRESSÃO V-10-01, SEUS INSTRUMENTOS ASSOCIADOS E SUA VÁLVULA DE SEGURANÇA. PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 REVISÃO: 0										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
19	PRESSÃO BAIXA	Problemas na válvula de alívio e segurança (PSV-10-01) ocasionando a abertura espúria da válvula, ou seja, abertura da válvula abaixo da pressão de ajuste.	- Transmissor de pressão PT-10-01.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	4	2	2	100	2	1,63
20	TEMPERATURA ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme	Pequeno vazamento de produto nos flanges do vaso V-10-01	3	2	1	2500	2	1,00
21	TEMPERATURA ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme	Ruptura franca do vaso V-10-01	2	5	2	25000	5	2,00
22	TEMPERATURA ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervisório.	Desvio na qualidade do produto final (separação flash), uma vez que o aumento de temperatura do vaso V-10-01 irá ocasionar o aumento da vaporização, gerando mais gás e menos líquido.	3	1	1	2500	1	1,00
23	TEMPERATURA ALTA	Incêndio externo (Fogo)	- Válvula de Segurança PSV-10-01 - Transmissor de pressão PT-10-01 com alarme configurado no supervisório.	Danos a integridade do V-10-01 causados pela sobrepressurização.	3	3	2	2500	3	1,26
24	VAZÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando aberta. (Por falha do transmissor de vazão, falha da lógica ou da válvula)	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto da separação flash)	5	1	2	10	1	1,63

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 NÓ 02: VASO DE PRESSÃO V-10-01, SEUS INSTRUMENTOS ASSOCIADOS E SUA VÁLVULA DE SEGURANÇA. REVISÃO: 0 PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
25	VAZÃO ALTA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com abertura indevida comandado pelo	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto)	5	1	2	5	1	2,00
26	VAZÃO ALTA	Desvio na malha de controle fazendo com que a FCV-01 trabalhe com abertura maior	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto)	4	1	1	100	1	1,00
27	VAZÃO NULA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 falhando fechada. (Por falha do transmissor de	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula,	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
28	VAZÃO NULA	Falha da válvula de controle FCV-10-01 com fechamento indevido comandado pelo	- Medição de vazão (FT-10-01) é considerado uma salvaguarda para cenário de vazão nula,	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	5	2	2,00
29	VAZÃO BAIXA	Desvio na malha de controle fazendo com que a FCV-01 trabalhe com abertura menor	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (variações nas proporções de projeto)	4	1	1	100	1	1,00
30	NÍVEL ALTO	Bloqueio no sistema de gás, impedindo assim a saída de gás do vaso V-10-01	Não existem salvaguardas para este cenário.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
31	NÍVEL ALTO	Bloqueio no sistema de líquido, impedindo assim a saída de líquido do vaso V-10-01	Não existem salvaguardas para este cenário.	Parada de produção com retorno de produção em horas.	5	2	2	10	2	2,00
32	NÍVEL ALTO	Bloqueio no sistema de líquido, impedindo assim a saída de líquido do vaso V-10-01	Não existem salvaguardas para este cenário.	Envio de líquido do V-10-01 para o sistema de gás, causando danos á equipamentos.	5	4	3	10	4	3,00
33	NÍVEL ALTO	Alteração da composição da carga que entra no V-10-01 (baixa proporção de leves em relação aos pesados)	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (separação flash), uma vez que a relação de separação gás/líquido será inferior ao projeto, fazendo com que o sistema de recebimento de gás e o sistema de recebimento de líquido opere fora das faixas de projeto.	5	1	2	10	1	1,63

PLANILHA HAZOP - ESTUDO DE CASO SISTEMA: TRANSFERÊNCIA PARA VASO DE SEPARAÇÃO GÁS/LÍQUIDO DATA: 01/05/2018 & 04/05/2018 NÓ 02: VASO DE PRESSÃO V-10-01, SEUS INSTRUMENTOS ASSOCIADOS E SUA VÁLVULA DE SEGURANÇA. REVISÃO: 0 PARTICIPANTES: Bruno (Processo), Adilson, Claudinei Brolo (Mec), Elmer Dennis (Eletrica), Pedro Prado (Instrumentação/Automação) LIDER DO HAZOP: Pedro Prado										
Item	Desvio	Causas	Salvaguardas	Consequências	Frequência (Categoria)	Severidade (Categoria)	Risco Convencional	Frequência (Anos)	Severidade (Categoria)	Risco FUZZY
34	NÍVEL ALTO	Aumento da pressão interna ao vaso V-10-01 diminuindo a vaporização. Causado pelo não funcionamento correto das malhas de controle a jusante e/ou montante do vaso.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (separação flash), uma vez que a relação de separação gás/liquído será inferior ao projeto, fazendo com que o sistema de recebimento de gás e o sistema de recebimento de líquido opere fora das faixas de projeto.	5	1	2	10	1	1,63
35	NÍVEL BAIXO	Alteração da composição da carga que entra no V-10-01 (alta proporção de leves em relação aos pesados)	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (separação flash), uma vez que a relação de separação gás/liquído será inferior ao projeto.	5	1	2	10	1	1,63
36	NÍVEL BAIXO	Vazamento no vaso de pressão V-10-01.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Pequeno vazamento de produto nos flanges do vaso V-10-01	4	2	1	8000	2	1,00
37	NÍVEL BAIXO	Vazamento no vaso de pressão V-10-01.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Ruptura franca do vaso V-10-01	2	5	2	10000000	5	2,00
38	NÍVEL BAIXO	Diminuição da pressão interna ao vaso V-10-01 diminuindo a vaporização. Causado pelo não funcionamento correto das malhas de controle a jusante e/ou montante do vaso.	Não existem salvaguardas para este cenário.	Desvio na qualidade do produto final (separação flash), uma vez que a relação de separação gás/liquído será inferior ao projeto, fazendo com que o sistema de recebimento de gás e o sistema de recebimento de líquido opere fora das faixas de projeto.	5	1	2	10	1	1,63